

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski program Gradbeništvo,
Smer operativno gradbeništvo

Kandidatka:
Ana Naglič

Seizmična analiza sakralnih objektov

Diplomska naloga št.: 413

Mentor:
doc. dr. Vlatko Bosiljkov

Ljubljana, 28. 1. 2011

IZJAVA O AVTORSTVU

Skladno s 27. členom Pravilnika o diplomskem delu UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo,

Podpisana **ANA NAGLIČ** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»SEIZMIČNA ANALIZA SAKRALNIH OBJEKTOV«

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Noben del tega zaključnega dela ni bil uporabljen za pridobitev strokovnega naziva ali druge strokovne kvalifikacije na tej ali na drugi univerzi ali izobraževalni instituciji.

Ljubljana, 17. januar 2011

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.042.7:699.841:726
Avtor:	Ana Naglič
Mentor:	doc. dr. Vlatko Bosiljkov
Somentorica:	asist. Meta Kržan
Naslov:	Seizmična analiza sakralnih objektov
Obseg in oprema:	146 str., 30 pregl., 40 graf., 101 sl.
Ključne besede:	Sakralni objekti, seizmična analiza, sanacije starih zidanih objektov, kulturna dediščina

Izvleček

V diplomskem delu smo celovito predstavili obnašanje sakralnih objektov v primeru potresne obtežbe ter sistematično analizirali odzive več sakralnih objektov v Posočju. V prvem poglavju naloge je na splošno opisano obnašanje zidanih stavb pri potresni obtežbi, predstavljene so posebnosti sakralnih objektov pri nas in njihovi tipični mehanizmi porušitev ob potresnih obremenitvah. V diplomski so obravnavane cerkve sveti Urh v Bovcu, sveti Anton v Kobaridu, sveti Anton Puščavnik v Čezsoči in sveta devica Marija na Polju. Praktičen del diplomske naloge je razdeljen na dva dela. V prvem delu so obravnavane, karakteristike potresov v Posočju, ki so prizadeli obravnavane cerkve in materialne lastnosti konstrukcij. Prvi del vsebuje tudi opis dveh programskih paketov (Sremb in 3Muri), uporabljenih za nelinearno statično seizmično analizo. V drugem delu naloge je predstavljena izvedena analiza posameznih cerkva. Analiza zajema splošni opis, opis zasnove posamezne konstrukcije, analizo poškodb po potresih in rezultate seizmične analize, narejene z enim ali obema programoma. Pri tem je bila potresna odpornost določena v odvisnosti od različnih materialnih lastnosti in ob upoštevanju faktorja poznavanja konstrukcije.

Izkaže se, da zahtevane potresne odpornosti po določilih Evrokoda 8 pri obravnavanih sakralnih objektih v obstoječem stanju v nobenem primeru ni mogoče doseči. Zaradi specifičnosti arhitekturne zasnove sakralnih objektov je seizmična odpornost v vzdolžni smeri objekta bistveno večja kot v prečni smeri. Pri analizah tovrstnih objektov se postavlja tudi vprašanje merodajnosti kontrolne točke (elementa oz. konstrukcijskega sklopa) pri kontroli talnega pospeška pri doseženem mejnem stanju. Pri vseh objektih so bili namreč najbolj

ranljivi prav zvoniki. Izbira ustreznih materialnih parametrov pri analizi rezultira z manjšimi spremembami tako brezdimenzionalnega koeficiente potresne odpornosti (SRC), kot nihajnega časa konstrukcije. Rezultati potresnih odpornosti, dobljenih z obema programoma, pa se močno razlikujejo zaradi različnih predpostavk obeh modelov. Program Sremb sloni na etažnem obnašanju objektov, kar pa ni prav značilno za sakralne objekte. S programom 3Muri pa smo dobili bistveno boljše ujemanje poškodb na objektu z numerično dobljenimi, vendar pa tudi bistveno manjše vrednosti za SRC. Zahtevane potresne odpornosti ne moremo doseči samo z injektiranjem zidov. Potrebni so tudi drugi ukrepi. Ranljivost tovrstnih objektov lahko bistveno zmanjšamo s povezovanjem zidov z vodoravnimi vezmi, kar smo numerično tudi pokazali.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.042.7:699.841:726
Author: Ana Naglič
Supervisor: Assist. Prof. Vlatko Bosiljkov
Co-supervisor: Meta Kržan
Title: Seismic Analysis Of Religions Buildings
Notes: 146 p., 30 tab., 40 gr., 101 fig.
Key words: Religions buildings, seismic resistance, strengthening interventions techniques of old masonry buildings, cultural heritage

Abstract

In this diploma thesis, the results of seismic analysis of several religious buildings (churches) from seismic prone area of Posočje are systematically investigated and presented. In the first chapter seismic behaviour of masonry buildings as well as typical mechanisms of failure of churches due to seismic loading are presented. Churches that were analyzed in this work were: st Urh in Bovec, st Anton in Kobarid, st Anton Puščavnik in Čezsoča and st devica Marija in Polje. The work on this thesis is divided into two main parts. In the first part, the characteristics of the seismic motions recorded in Posočje region as well as the mechanical parameters of the structures used in the analysis are presented. In this part also presentation of two software packages for the non-linear seismic assessment of resistance of masonry structures (Sremb and 3Muri) are briefly presented. In the second part of this thesis, the results of analysis of churches is done in systematic approach: general overview, layout and characteristics of structure, results of crack pattern survey following the seismic events and finally the results of seismic analysis of the structure by either one or both software packages. Additional parameter that was varied through this investigation was the set of material parameters that might influence the results of analysis.

The results of analysis revealed that requirements of Eurocode 8 can not be met for this type of structures in as-built conditions. Due to specific elements of architecture of churches and their layouts, their seismic resistance in the direction of the main nave is much higher than in perpendicular one. The results of analysis of those structures impose also the question of the

appropriate control point (node or structural element) that would be reliable for the calculation of the peak ground acceleration for particular limit state of the structure. For all analyzed churches, bell towers seemed to be the most vulnerable element. Depending from the chosen set of material parameters used in analysis, moderate changes may be expected regarding the seismic resistance coefficient (SRC) as well as for the period of the first mode. The results of seismic non-linear analysis derived through two different software packages differ significantly. Pre-assumption for the application of Sremb is storey mechanisms of failure of the structure, which is hardly applicable for churches. The results of 3Muri regarding the failure mechanisms obtained by numerical analysis corresponded well with observed crack patterns following seismic events. With 3Muri considerable lower values for SRC were obtained in comparison to Sremb. Solely by grouting existing walls desired values of seismic resistance according to EC8 can not be attained. Vulnerability of such structures can be significantly improved by introducing horizontal ties, which was numerically approved.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Vlatku Bosiljkovu, somentorici asist. Meti Kržan, udig. in mladi raziskovalki Patricii Cotič, udig..

Zahvaljujem se tudi družini in prijateljem, ki sem jih spoznale tekom študija, za podporo tako pri diplomi kot tudi pri celotnem študiju.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	OBNAŠANJE ZIDANIH STAVB MED POTRESI - SPLOŠNO	3
3	KONSTRUKCIJSKI SKLOPI SAKRALNIH OBJEKTOV.....	5
4	MEHANIZMI PORUŠITVE SAKRALNIH OBJEKTOV.....	9
4.1	Prevrnitev fasade	9
4.2	Prevrnitev zatrepnega dela fasade	9
4.3	Strižne poškodbe v ravnini fasade.....	10
4.4	Poškodbe narteksa (preddverje)	10
4.5	Prečne vibracije vzdolžne ali prečne ladje	11
4.6	Strižne razpoke v vzdolžnih zidovih	11
4.7	Vzdolžne vibracije glavne ladje	11
4.8	Oboki glavne ladje	12
4.9	Prečna ladja in oboki	12
4.10	Prevrnitev zaključnega (fasadnega) zidu prečne ladje	13
4.11	Ravninska (strižna) porušitev zaključnega zidu prečne ladje.....	13
4.12	Oboki prečne ladje	13
4.13	Slavolok (triumfalni lok).....	14
4.14	Kupola – boben kupole	14
4.15	Laterna	15
4.16	Prevrnitev in poškodbe apside.....	15
4.17	Strižne razpoke prezbiterijske oziroma apside.....	15
4.18	Oboki prezbiterijske oziroma apside	16
4.19	Streha – glavna ladja	16
4.20	Streha – prečna ladja	17
4.21	Streha – apsida oziroma prezbiterijske	17
4.22	Prevrnitev kapele.....	17
4.23	Strižne razpoke kapele	18
4.24	Oboki kapele	18
4.25	Sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije.....	19
4.26	Prevrnitev izpostavljenih elementov (zvonik na preslico, koničaste strehe zvonikov, itd.)	19
4.27	Stolp zvonika.....	19
4.28	Zvonica, prostor pod zvonikom	20
5	ANALIZE POTRESNE ODPORNOSTI SAKRALNIH OBJEKTOV	21

6	POTRESI V ZGORNJEM POSOČJU	23
6.1	Potres v Zgornjem Posočju leta 1976	23
6.2	Potres v Zgornjem Posočju leta 1998	24
6.3	Potres v Zgornjem Posočju leta 2004	26
6.4	Potresni pospešek tal	27
7	OBTEŽBE IN MATERIAL.....	28
7.1	Obtežbe.....	28
7.1.1	Stalna/lastna obtežba	28
7.1.2	Spremenljiva obtežba	28
7.1.3	Potresna obtežba.....	29
7.2	Material	30
8	RAČUNALNIŠKA PROGRAMA SREMB IN 3MURI	32
8.1	RAČUNALNIŠKI PROGRAM SREMB	33
8.1.1	Predpostavke računa	33
8.1.2	Konstruiranje etažne histerezne ovojnice	34
8.1.2.1	Idealizirana histerezna ovojnica zidu	34
8.1.2.2	Etažna histerezna ovojnica.....	35
8.1.2.3	Idealizirana etažna histerezna ovojnica.....	36
8.1.3	Preverjanje potresne odpornosti	37
8.2	RAČUNALNIŠKI PROGRAM 3MURI	38
8.2.1	FME metoda	38
8.2.2	Nelinearna statična analiza	39
8.2.2.1	Podajanje vhodnih podatkov	39
8.2.2.2	Računska analiza.....	40
8.2.2.3	Kontrola rezultatov	41
8.2.3	Rezultati	41
8.2.3.1	Prikaz rezultatov na primeru	43
9	ANALIZA POTRESNE ODPORNOSTI CERKEV SVETEGA URHA V BOVCU.....	46
9.1	Opis	46
9.2	Zasnova konstrukcije.....	47
9.3	Analiza poškodb	49
9.4	Seizmična analiza	52
9.4.1	Analiza s programom 3Muri.....	52
9.4.1.1	Modeliranje konstrukcije	52
9.4.1.1.1	Etažne višine.....	52
9.4.1.1.2	Stropne plošče.....	54
9.4.1.1.3	Strešna konstrukcija.....	54

9.4.1.1.4	Zvonik	55
9.4.1.2	Nelinearna statična analiza	56
9.4.1.3	Rezultati	57
9.4.1.3.1	Model objekta z zvonikom	58
9.4.1.3.2	Model objekta s porezanim zvonikom	63
9.4.2	Analiza s programom Sremb	69
9.4.2.1	Modeliranje konstrukcije	69
9.4.2.2	Rezultati	70
10	ANALIZA POTRESNE ODPORNOSTI CERKVE SVETEGA ANTONA V KOBARIDU	74
10.1	Opis	74
10.2	Zasnova konstrukcije	75
10.3	Analiza poškodb	77
10.4	Seizmična analiza	79
10.4.1	Analiza s programom 3Muri	80
10.4.1.1	Modeliranje konstrukcije	80
10.4.1.1.1	Etažne višine	80
10.4.1.1.2	Stropne plošče	81
10.4.1.1.3	Strešna konstrukcija	81
10.4.1.2	Nelinearna statična analiza	83
10.4.1.3	Rezultati	84
10.4.1.3.1	Izbira kontrolnega vozlišča	85
10.4.1.3.2	Model objekta – izbrano vozlišče	87
10.4.2	Analiza s programom Sremb	93
10.4.2.1	Modeliranje konstrukcije	93
10.4.2.2	Rezultati	93
11	ANALIZA POTRESNE ODPORNOSTI CERKVE SVETEGA ANTONA PUŠČAVNIKA V ČEZSOČI	96
11.1	Opis	96
11.2	Zasnova konstrukcije	96
11.3	Analiza poškodb	98
11.4	Seizmična analiza	101
11.4.1	Modeliranje konstrukcije	101
11.4.1.1	Etažne višine	101
11.4.1.2	Stropne plošče	103
11.4.1.3	Strešna konstrukcija	104
11.4.1.4	Zvonik	105
11.4.1.5	Nelinearna statična analiza	105
11.4.2	Rezultati	106
11.4.2.1	Model objekta z zvonikom	107

11.4.2.2	Model objekta s porezanim zvonikom	111
12	ANALIZA POTRESNE ODPORNOSTI CERKEV SVETE DEVICE MARIJE V POLJU.....	116
12.1	Opis	116
12.2	Zasnova konstrukcije.....	117
12.3	Analiza poškodb	118
12.4	Seizmična analiza	120
12.4.1	Modeliranje konstrukcije	121
12.4.1.1	Etažne višine	121
12.4.1.2	Stropne plošče.....	121
12.4.1.3	Strešna konstrukcija	122
12.4.2	Prvi sanacijski ukrep.....	123
12.4.3	Drugi sanacijski ukrep.....	124
12.4.4	Nelinearna statična analiza	124
12.4.5	Rezultati	125
12.4.5.1	Modeli različnih stropih konstrukcij nad prezbitrijem.....	126
12.4.5.2	Variirane materialne karakteristike	128
12.4.5.3	Sanacijski ukrepi.....	133
13	KOMENTAR REZULTATOV SEIZMIČNIH ANALIZ	137
14	ZAKLJUČEK	140

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Specifične teže uporabljenih materialov	28
Preglednica 2: Materialne lastnosti zidov – OPCM 2003	30
Preglednica 3: Materialne lastnosti zidov– Tehnična pisarna v Bovcu	31
Preglednica 4: Materialne lastnosti ob upoštevanju CF – OPCM 2003	31
Preglednica 5: Materialne lastnosti ob upoštevanju CF – Tehnična pisarna v Bovcu	31
Preglednica 6: Lastna površinska obtežba stropnih plošč, Cerkev sv. Urha v Bovcu	54
Preglednica 7: Lastna obtežba strešne konstrukcije, Cerkev sv. Urha v Bovcu	55
Preglednica 8: Lastna obtežba zvonika, Cerkev sv. Urha v Bovcu	55
Preglednica 9: Rezultati nelinearne statične analize za neinjektirano stanje zidovine,	59
Preglednica 10: Rezultati nelinearne statične analize za injektirano stanje zidovine,	60
Preglednica 11: Rezultati nelinearne statične analize za neinjektirano stanje zidovine,	64
Preglednica 12: Rezultati nelinearne statične analize za injektirano stanje zidovine,	65
Preglednica 13: Lastna površinska obtežba stropnih konstrukcij, Cerkev sv. Antona v Kobaridu	81
Preglednica 14: Lastna obtežba strešne konstrukcije, Cerkev sv. Antona v Kobaridu	82
Preglednica 15: Rezultati analize za različne kontrolne točke, Cerkev sv. Antona v Kobaridu	85
Preglednica 16: Rezultati analize za neinjektirano stanje zidovine,	88
Preglednica 17: Rezultati analize za injektirano stanje zidovine,	89
Preglednica 18: Lastna površinska obtežba stropnih plošč,	103
Preglednica 19: Lastna obtežba strešne konstrukcije, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči	104
Preglednica 20: Lastna obtežba zvonika, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči	105
Preglednica 21: Rezultati analize za neinjektirano stanje zidovine,	107
Preglednica 22: Rezultati analize za injektirano stanje zidovine,	108
Preglednica 23: Rezultati analize za neinjektirano stanje zidovine,	111
Preglednica 24: Rezultati analize za injektirano stanje zidovine,	112
Preglednica 25: Lastna površinska obtežba stropnih plošč, Cerkev sv. device Marije v Polju	122
Preglednica 26: Lastna obtežba strešne konstrukcije, Cerkev sv. device Marije v Polju	123
Preglednica 27: Rezultati nelinearne statične analize za tri različne računske modele z enakimi materialnimi karakteristikami, Cerkev sv. device Marije v Polju	126
Preglednica 28: Rezultati analize za neinjektirano stanje zidovine,	128
Preglednica 29: Rezultati analize za injektirano stanje zidovine,	129
Preglednica 30: Rezultati analize za modele, na katerih so uporabljeni sanacijski ukrepi, Cerkev sv. device Marije v Polju	133

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primerjava prvih nihajnih časov, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z zvonikom).....	61
Grafikon 2: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu.....	61
Grafikon 3: Primerjava vrednosti ULSPG za smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu.....	62
Grafikon 4: Primerjava prvega nihajnega časa, Cerkev sv. Urha v Bovcu.....	66
Grafikon 5: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y iz 3Murija,	66
Grafikon 6: Primerjava vrednosti ULSPG-ja za smer X in Y iz 3Murija,	67
Grafikon 7: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize – smer X, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z porezanim zvonikom)	68
Grafikon 8: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize - smer Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z porezanim zvonikom)	68
Grafikon 9: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (Sremb).....	70
Grafikon 10: Idealizirane histerezne ovojnice merodajne za posamezne primere analize - smer X, Cerkev sv. Urha v Bovcu (Sremb).....	71
Grafikon 11: Idealizirane histerezne ovojnice merodajne za posamezne primere analize - smer X, Cerkev sv. Urha v Bovcu (Sremb).....	71
Grafikon 12: Primerjava vrednosti SRC za smer X iz Sremb-a in 3Muri-ja,	72
Grafikon 13: Primerjava vrednosti SRC za smer Y iz Sremb-a in 3 Muri-ja,	72
Grafikon 14: Primerjava vrednosti SRC (levo) in ULSPG (desno) za smer X in Y,	86
Grafikon 15: Idealizirane histerezne ovojnice merodajne za posamezne primere analize - smer X in Y, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (Izbira kontrolnega vozlišča)	86
Grafikon 16: Primerjava prvega nihajnega časa, Cerkev sv. Antona v Kobaridu.....	90
Grafikon 17: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y iz 3Murija, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče).....	90
Grafikon 18: Primerjava vrednosti ULSPG-ja za smer X in Y iz 3Murija, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče).....	91
Grafikon 19: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize - smer X, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče).....	91
Grafikon 20: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize - smer Y, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče).....	91
Grafikon 21: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y,	94
Grafikon 22: Idealizirane histerezne ovojnice merodajne za posamezne primere analize - smer X , Cerkev sv. Antona v Kobaridu (Sremb)	94
Grafikon 23: Idealizirane histerezne ovojnice merodajne za posamezne primere analize - smer Y , Cerkev sv. Antona v Kobaridu (Sremb)	94
Grafikon 24: Primerjava vrednosti SRC za smer X iz Sremb-a in 3Muri,.....	95
Grafikon 25: Primerjava vrednosti SRC za smer Y iz Sremb-a in 3Muri-ja,	95

Grafikon 26: Primerjava prvega nihajnega časa, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči.....	109
Grafikon 27: Primerjava vrednosti SRC-ja in ULSPG-ja za smer Y iz 3Murija,	109
Grafikon 28: Primerjava prvega nihajnega časa, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči.....	113
Grafikon 29: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y iz 3Murija,	113
Grafikon 30: Primerjava vrednosti ULSPG-ja za smer X in Y iz 3Murija, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči (3D model objekta s porezanim zvonikom)	113
Grafikon 31: Primerjava SRC-jev glede na izvedbo stropa nad prezbiterijem,	127
Grafikon 32: Primerjava ULSPG-jev glede na izvedbo stropa nad prezbiterijem,	127
Grafikon 33: Primerjava prvega nihajnega časa, Cerkev sv. device Marije v Polju (variantne materialne karakteristike)	130
Grafikon 34: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y iz 3Murija, Cerkev sv. device Marije v Polju (variantne materialne karakteristike)	130
Grafikon 35: Primerjava vrednosti ULSPG-ja za smer X in Y iz 3Murija, Cerkev sv. device Marije v Polju (spreminjane materialne karakteristike)	131
Grafikon 36: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize - smer X, Cerkev sv. device Marije v Polju (spreminjane materialne karakteristike)	131
Grafikon 37: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize - smer Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (spreminjane materialne karakteristike)	131
Grafikon 38: Primerjava prvih nihajnih časov, Cerkev sv. device Marije v Polju (sanacijski ukrepi)	134
Grafikon 39: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (sanacijski ukrepi)	134
Grafikon 40: Primerjava vrednosti ULSPG-ja za smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (sanacijski ukrepi)	135

KAZALO SLIK

Slika 1: Tipični mehanizmi porušitve zidu pri potresni obtežbi	4
Slika 2: Ovojnica strižnega obnašanja zidovine v odvisnosti od nivoja tlačnih obremenitev	4
Slika 3: Konstrukcijski sklopi sakralnega objekta. Notre-Dame d'Amiens (Pridobljeno 2010)	5
Slika 4: Glavna ladja	7
Slika 5: Stranski ladji	7
Slika 6: Prečna ladja	7
Slika 7: Narteks	8
Slika 8: Prevrnitev fasade	9
Slika 9: Prevrnitev zatrepnega dela fasade	10
Slika 10: Strižne poškodbe v ravnini fasade	10
Slika 11: Poškodbe narteksa (preddverje)	10
Slika 12: Prečne vibracije vzdolžne ali prečne ladje	11
Slika 13: Strižne razpoke v vzdolžnih zidovih	11
Slika 14: Vzdolžne vibracije glavne ladje	12
Slika 15: Oboki glavne ladje (banjasti obok levo in križni obok desno)	12
Slika 16: Prečna ladja in oboki	12
Slika 17: Prevrnitev zaključnega (fasadnega) zidu prečne ladje	13
Slika 18: Ravnska (strižna) porušitev zaključnega zidu prečne ladje	13
Slika 19: Oboki prečne ladje	14
Slika 20: Slavolok (triumfalni lok)	14
Slika 21: Kupola – boben kupole	14
Slika 22: Laterna	15
Slika 23: Prevrnitev in poškodbe apside	15
Slika 24: Strižne razpoke prezbiterija oziroma apside	16
Slika 25: Oboki prezbiterija oziroma apside	16
Slika 26: Streha - glavna ladja	16
Slika 27: Streha – prečna ladja	17
Slika 28: Streha – apsida oziroma prezbiterij	17
Slika 29: Prevrnitev kapele	18
Slika 30: Strižne razpoke	18
Slika 31: Oboki kapele	18
Slika 32: Sodelovanje med posameznimi deli konstrukcije	19
Slika 33: Prevrnitev izpostavljenih elementov	19
Slika 34: Stolp zvonika	20
Slika 35: Zvonica, prostor pod zvonikom	20
Slika 36: Breginski kot ter Posočje na karti Slovenije - zemljevid. (Pridobljeno 2010)	24

Slika 37: a.) cerkev v Podbeli pred potresom, b.) po potresu. Potres 1976.(Pridobljeno 2010)	24
Slika 38: Zapis potresa v zgornjem Posočju, 12. aprila 1998. Potres 1998. (Pridobljeno 2010)	25
Slika 39: Zapis potresa v zgornjem Posočju, 12. junija 2004. Potres 2004. (Pridobljeno 2010)	26
Slika 40: Temeljna karta potresne nevarnosti Slovenije. Karta. (Pridobljeno 2010)	27
Slika 41: Preverjanje potresne odpornosti na podlagi izračunane krivulje odpornosti zidane stavbe (Tomažević, 2009)	38
Slika 42: Stena, modelirana z mrežo makroelementov in ekvivalentni okvir (S.T.A DATA)	39
Slika 43: Barvna legenda poškodovanosti za zidovje (S.T.A. DATA, 2009)	41
Slika 44: Določitev bilinearne ovojnice v N2 metodi (S.T.A. DATA, 2009)	42
Slika 45: Tabela rezultatov v 3Muriju	43
Slika 46: Okno s podrobnimi rezultati analize	44
Slika 47: Podrobni rezultati »pushover« analize	44
Slika 48: Fotografija cerkve sv. Urha v Bovcu	46
Slika 49: Tloris pritličja, Cerkev sv. Urha v Bovcu	47
Slika 50: a.) Kataster poškodb - severna fasada in b.) kataster južna fasada,	49
Slika 51: Kataster poškodb - vzhodna fasada, Cerkev sv. Urha v Bovcu	50
Slika 52: Kataster poškodb - zahodna fasada, Cerkev sv. Urha v Bovcu	51
Slika 53: Etažne višine objekta, Cerkev sv. Urha v Bovcu	53
Slika 54: Tloris ostrešja, Cerkev sv. Urha v Bovcu	55
Slika 55: a.) 3D model z zvonikom in b.) 3D model z porezanim zvonikom,	56
Slika 56: Zaporedna števila vozlišč in ravnin zidov na tlorisu nadstropja,	57
Slika 57: Prikaz poškodb stene P1 (levo) in stene P2 (desno) pred injektiranjem; smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z zvonikom)	62
Slika 58: Prikaz poškodb stene P1 (levo) in stene P2 (desno) po injektiranju; smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z zvonikom)	63
Slika 59: Prikaz poškodb stene P1 (levo) in stene P2 (desno) pred injektiranjem; smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z porezanim zvonikom)	69
Slika 60: Model v Srembu, Cerkev sv. Urha v Bovcu	70
Slika 61: Fotografija Cerkve sv. Antona v Kobaridu	74
Slika 62: Tloris pritličja, Cerkev sv. Antona v Kobaridu	75
Slika 63: a.) Kataster poškodb - južna fasada in b.) kataster razpok severna fasada,	77
Slika 64: Kataster poškodb - severna fasada, Cerkev sv. Antona v Kobaridu	78
Slika 65: Kataster poškodb - vzhodna fasada, Cerkev sv. Antona v Kobaridu	79
Slika 66: Etažne višine objekta, Cerkev sv. Antona v Kobaridu	80
Slika 67: Tloris ostrešja, Cerkev sv. Antona v Kobaridu	82
Slika 68: 3D model objekta, Cerkev sv. Antona v Kobaridu	82
Slika 69: Mreži z dvo-vozliščnimi makroelementi, Cerkev sv. Antona v Kobaridu	83
Slika 70: Zaporedna števila vozlišč in ravninskih zidov na tlorisu nadstropja,	84

Slika 71: Prikaz poškodb stene P6 (levo) in stene P9 (desno) pred injektiranjem (podatki- Posočje); smer X in Y, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče).....	92
Slika 72: Prikaz poškodb stene P6 (levo) in stene P9 (desno) po injektiranju (podatki – Posočje); smer X in Y, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče).....	92
Slika 73: Model v Srembu, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (Sremb).....	93
Slika 74: Fotografija Cerkve sv. Antona Puščavnika v Čezsoči.....	96
Slika 75: Tloris pritličja, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči.....	97
Slika 76: a.) Kataster poškodb - južna fasada in b.) kataster razpok - severna fasada,	98
Slika 77: Kataster poškodb - vzhodna fasada, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči	99
Slika 78: Kataster poškodb - vzhodna fasada, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči	100
Slika 79: Etažne višine objekta, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči.....	102
Slika 80: Tloris ostrešja, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči	104
Slika 81: a.) 3D model z zvonikom in b.) 3D model z porezanim zvonikom,	105
Slika 82: Zaporedna števila vozlišč in ravninskih zidov na tlorisu nadstropja,	106
Slika 83: Prikaz poškodb stene P14 (levo) in stene P1 (desno) po injektiranju; smer X in Y, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči, (3D model objekta z zvonikom).....	110
Slika 84: Prikaz poškodb stene P14 (levo) in stene P1 (desno) pred injektiranjem; smer X in Y, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči (3D model objekta s porezanim zvonikom).....	114
Slika 85: Prikaz poškodb stene P14 (levo) in stene P1 (desno) po injektiranju; smer X in Y, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči (3D model objekta s porezanim zvonikom)	114
Slika 86: Fotografija Cerkev sv. device Marije v Polju.....	116
Slika 87: Tloris pritličja, Cerkev sv. device Marije v Polju.....	117
Slika 88: a.) Kataster poškodb – južna fasad, b.) kataster poškodb - severna fasada,.....	118
Slika 89: Kataster poškodb - zahodna fasada, Cerkev sv. device Marije v Polju	119
Slika 90: Kataster poškodb - vzhodna fasada, Cerkev sv. device Marije v Polju.....	120
Slika 91: Etažne višine objekta, Cerkev sv. device Marije v Polju.....	121
Slika 92: Definicija stropov oziroma modeliranje v 3Muriu,	122
Slika 93: Tloris ostrešja, Cerkev sv. device Marije v Polju.....	123
Slika 94: a.) 3D modeli – prvi sanacijski ukrep; b.) 3D model – drugi sanacijski ukrep;.....	123
Slika 95: Razporeditev jeklenih vezi, označenih z modro barvo,	124
Slika 96: Razporeditev AB vencev, obarvanih sivo, ter razporeditev jeklenih vezi po prezbitariju, obarvanih z modro barvo, Cerkev sv. device Marije v Polju	124
Slika 97: Zaporedna števila vozlišč in ravninskih zidov na tlorisu nadstropja,	125
Slika 98: Prikaz poškodb stene P5 (levo) in stene P4 (desno) pred injektiranjem; smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (Variantne materialne karakteristike).....	132
Slika 99: Prikaz poškodb stene P5 (levo) in stene P4 (desno) po injektiranju; smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (Variantne materialne karakteristike).....	132

Slika 100: Prikaz poškodb stene P5 (levo) in stene P4 (desno) po injektiranju in izvedbi prvega sanacijskega ukrepa; smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (sanacijski ukrepi).....	135
Slika 101: Prikaz poškodb stene P5 (levo) in stene P4 (desno) po injektiranju in izvedbi drugega sanacijskega ukrepa; smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (sanacijski ukrepi).....	136

1 UVOD

Obnova starih sakralnih objektov oziroma njihovo vzdrževanje postajata vedno bolj pomembna tudi na slovenskem, saj predstavljajo ti statusni simbol neke vasi, zaselka ali mesta. Značilnost teh vrst objektov je, da izkazujejo tudi velik zgodovinski pomen, saj se med seboj razlikujejo glede na obdobje, v katerem so bili zgrajeni. Zaradi njihove arhitekturne, etnološke, urbane in predvsem zgodovinske vrednosti predstavljajo večji del kulturne dediščine našega naroda in je skrb za njih zelo pomembna. Trenutno je pri nas več kot 1500 objektov sakralne dediščine.

Gradbeniki, ki smo odgovorni za samo nosilnost in stabilnost objekta, pogosto pridemo do vprašanja: »Ali so ti objekti glede na njihovo starost in zasnovo še dovolj varni ob upoštevanju sodobnih predpisov, saj so bili grajeni še v času, ko gradbeništvo ni bilo tako razvito, kot je danes?«. Zavedati se moramo, da sakralni objekti spadajo med stavbe višje kategorije pomembnosti, pri katerih je glede na posledice porušitve zagotavljanje potresne odpornosti pomembno, saj je potresno tveganje za te objekte bistveno večje kot pri navadnih objektih. Potresno odpornost teh objektov je potrebno zagotoviti v duhu odgovornosti, ki jo nosimo za ohranitev stavb kulturne dediščine nadaljnjim generacijam. Sistemi za ojačanje konstrukcij ne smejo posegati v notranjo arhitekturo objektov, uporabljeni materiali pa ne smejo povzročati morebitne dodatne poškodbe poslikav in štukatur.

Nosilnost in stabilnost objekta v gradbeni stroki zagotavljamo s pojmom zadostna varnost, ki se pri kulturnih spomenikih razlikuje od varnosti, ki jo morajo zagotavljati običajni objekti. V primeru obstoječih arhitekturnih in kulturnih zgradb zgodovinskega pomena je zaradi njihove tipološke različnosti in specifičnih značilnosti kot kulturnih spomenikov (tudi zaradi različne tipologije gradnje po posameznih zgodovinskih obdobjih) očitna težavnost definirati ustrezni postopek za zagotovitev varnosti po predpisih, ki so enaki tistim, ki se nanašajo na navadne objekte stavbne dediščine oziroma sodobne objekte. Zaradi omenjenega je splošna težavnost tudi v tem, da ni razvitega enostavnega postopka za preverjanje potresne odpornosti takih objektov. Na splošno velja, da si pri analizah tovrstnih stavb lahko pomagamo z elastično, nelinearno statično ali dinamično analizo. Z elastično analizo dobimo precej konzervativne

rezultate, nelinearna dinamična analiza teh stavb pa bi za prakso pomenila preveč dolgotrajno delo.

V diplomski nalogi smo želeli ugotoviti, ali lahko s poenostavljeno nelinearno statično analizo dovolj natančno ocenimo potresno odpornost objekta, da je kljub poenostavitvam modela ocena potresne odpornosti še zmeraj zanesljiva in da lahko s stroškovno ugodnimi ukrepi protipotresne ojačitve zagotovimo potresno varnost tovrstnih objektov. Da bi zaradi specifičnosti, ki jo izkazujejo sakralni objekti, dobili bolj zanesljivo oceno učinkovitosti izbrane metode izračuna, je bila analiza potresne odpornosti opravljena na primerih štirih cerkva iz Zgornjega Posočja, ki so jih v zadnjih desetletjih poškodovali močnejši potresi. Ker so bili na teh cerkvah izdelani katastri razpok, je bila približno znana vrednost pospeškov, ki so povzročili poškodbe. Zato je bila mogoča neposredna primerjava stanja poškodovanosti objekta, ki ga poda program pri doseženi seizmični odpornosti. Numerična analiza je bila opravljena z dvema programskima paketoma, 3Murijem (razvit na univerzi v Genovi) in v dveh primerih še s Srebmom (razvit na ZRMK), ki temeljita na različnih predpostavkah modelov stavb. Pri tem smo želeli za primer cerkva ugotoviti uporabnost modela ob predpostavkah, ki jih uporabljamo pri analizah zidanih stavb.

Ker na cerkvah niso bili izvedeni in-situ preizkusi za pridobitev materialnih karakteristik zidovja, so zanje bili uporabljeni podatki Tehnične pisarne v Bovcu, dobljeni na osnovi in-situ in laboratorijskih preiskav več zvrst zidovin s tega območja. Dodatno pa še podatki, ki jih ponuja program 3Muri v skladu z veljavnim italijanskim standardom na področju preverjanja potresne odpornosti zidanih stavb. Na primeru ene cerkve sta bila podana tudi dva sanacijska ukrepa za izboljšanje potresne odpornosti ob upoštevanju ohranjanja arhitekturne zasnove objekta.

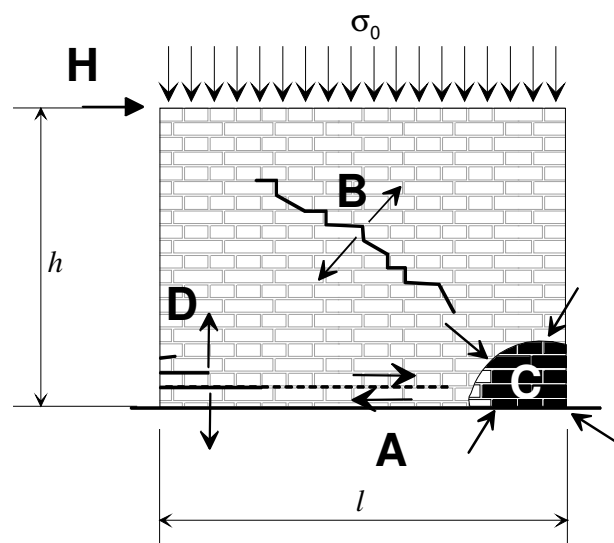
2 OBNAŠANJE ZIDANIH STAVB MED POTRESI - SPLOŠNO

Sakralne objekte prištevamo med zidane stavbe. Obnašanje zidanih stavb med potresi kot celote je odvisno od razporeditve nosilnih vertikalnih elementov, v največji meri pa od povezanosti zidov v različnih smereh ter v višini stropnih konstrukcij, saj je od tega odvisno nihanje zidanih stavb.

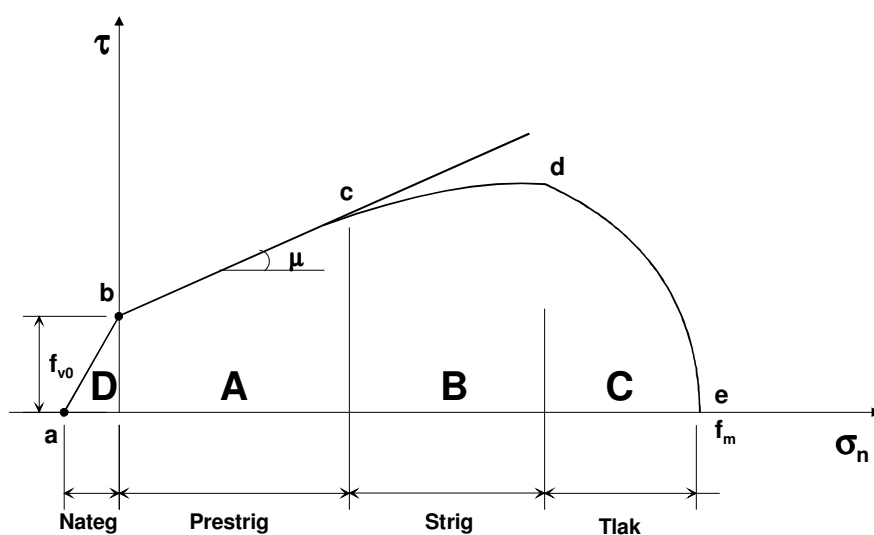
Če zidana stavba s podajnimi lesenimi stropi nima zidnih vezi, je nihanje zidov neuskklajeno, saj se skušajo posamezni zidovi med potresom ločiti med seboj. Zaradi tega nastopijo razpoke bodisi zaradi upogiba izven ravnine zidov bodisi zaradi premajhne natezne trdnosti zidov. Če so zidovi povezani z zidnimi vezmi, je nihanje že bolj usklajeno, vendar je zaradi podajnosti stropov še vedno izrazit upogib zidov izven njihove ravnine. Potresna odpornost zidane stavbe je največja, če so zidovi med seboj povezani z zidnimi vezmi in togimi stropnimi ploščami. Takrat lahko pri računu potresne odpornosti stavbe za posamezno smer upoštevamo tudi vpliv zidov, ki stoje pravokotno na smer delovanja potresa. Mehanizem obnašanja posameznega zidu v stavbi pa je odvisen od njegovega položaja v stavbi, geometrijskih in materialnih karakteristik zidu, pogojev vpetosti ter razmerja med navpično obremenitvijo in vodoravno potresno obtežbo. V primeru potresa, vztrajnostne sile, ki na zid delujejo v njegovi ravnini, pa povzročijo, da se zid obnaša kot prava strižna stena. Pri tem so možni trije mehanizmi porušitve zidu (slika 1):

- (A) prestrižni mehanizem porušitve - pri majhnih navpičnih obremenitvah in slabi kakovosti malte; pri tem se zid prestriže na dva dela;
- (B) strižni mehanizem porušitve - nastopi pri preseženi natezni trdnosti zidovja v diagonalni smeri, kar vidimo kot nastanek poševnih razpok. Omenjeni mehanizem je pri zidanih stavbah najpogostejši;
- (C) upogibni mehanizem porušitve - nastopi pri prekoračitvi tlačnih napetosti na robu, ko je natezna trdnost zidovja dovolj velika; porušitev je vidna kot drobljenje zidakov na tlačnem robu. Mehanizem predvsem pri nearmiranem zidovju ni pogost.

Prav zaradi kompozitnega obnašanja zidovine, obvojnica strižnega obnašanja zidov pri delovanju potresne obtežbe je dokaj kompleksna in je v odvisnosti od mehanizmov porušitve prikazana na sliki 2.



Slika 1: Tipični mehanizmi porušitve zidu pri potresni obtežbi

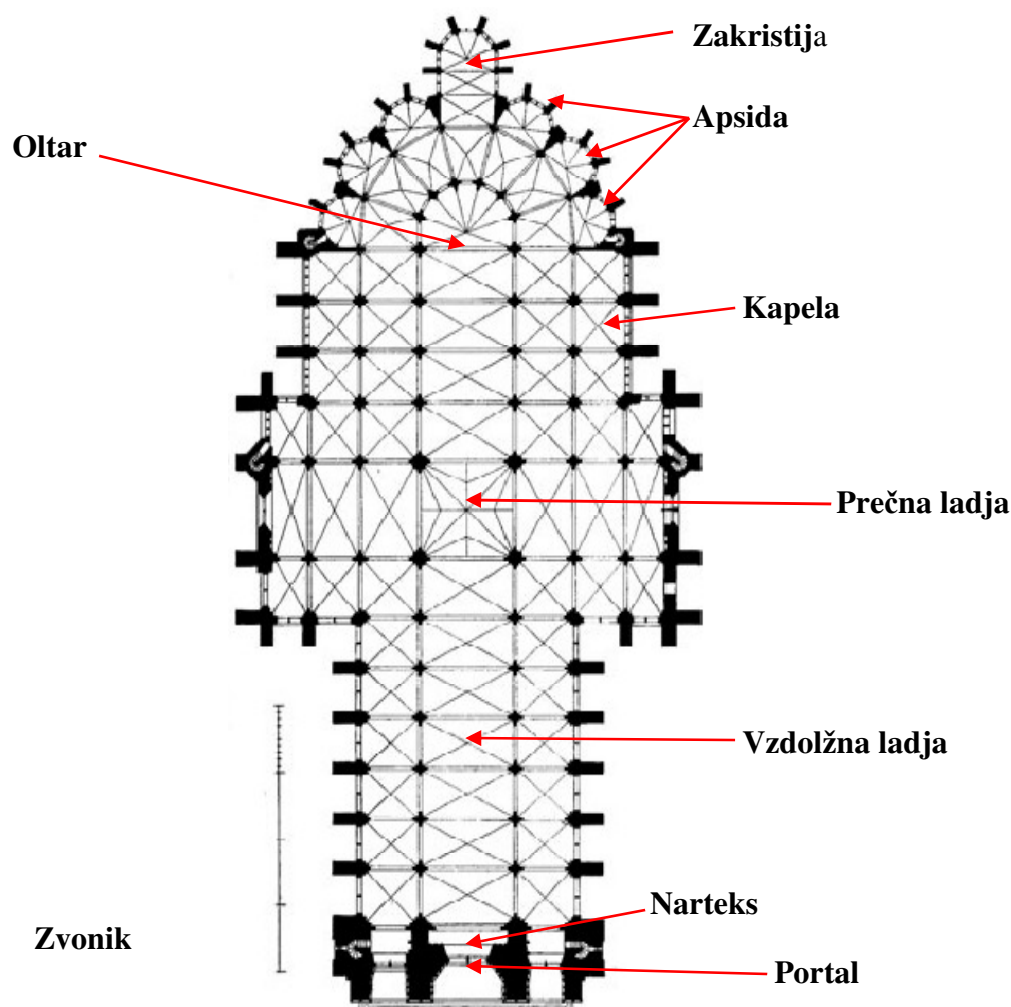


Slika 2: Ovojnica strižnega obnašanja zidovine v odvisnosti od nivoja tlačnih obremenitev

3 KONSTRUKCIJSKI SKLOPI SAKRALNIH OBJEKTOV

Sakralni objekt je zgradba, ki je namenjena izključno za opravljanje bogoslužja. Glede na religijo, geografsko regijo ter umetnostnozgodovinsko obdobje, iz katerega izhajajo, se take zgradbe razlikujejo po svoji arhitektonski zasnovi, velikosti, notranji opreми ter simboliki.

Konstruktivna zasnova sakralnih objektov (Slika 3) je opisana s strokovnimi izrazi, ker pa ti gradbeni stroki niso splošno znani, so v nadaljevanju tega poglavja širše obrazloženi. Obrazložitev teh izrazov bo koristila za lažje razumevanje celotnega diplomskega dela.



Slika 3: Konstrukcijski sklopi sakralnega objekta. Notre-Dame d'Amiens (Pridobljeno 2010)

Zakristíja (latinska beseda: sacristia) je v krščanskih cerkvah zahodnega obreda po navadi levo ali desno od glavnega oltarja, včasih pa je tudi povsem ločena od glavne cerkvene stavbe (npr. v nekaterih samostanih). Običajno je namenjena shranjevanju plaščev in drugih liturgičnih oblačil, neposvečenih hostij, liturgičnih posod (kelihi, ciboriji, patene, ipd), bogoslužnih knjig (misal, lekcionar, itd), marsikdaj pa tudi župnijskih matičnih knjig (krstna knjiga, poročna knjiga, itd). Zakristijo uporabljajo duhovniki in ministranti tudi kot preoblačilnico in kot prostor duhovne priprave na bogoslužje. Zakristija. (Pridobljeno 2010).

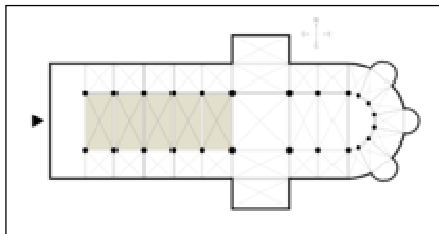
Ápsida ali apsída (latinska beseda: apsis) v arhitekturi pomeni:

- V cerkvenem gradbeništvu je apside privzeta iz poznoantičnega rimskega stavbarstva in pomeni polkrožen, s polovično kupolo obokan prostor, ki je dodan glavnemu prostoru, ali pa vključen v glavni prostor. Navadno se apside pojavljajo v romanskih cerkvah.
- V krščanskem sakralnem stavbarstvu pa je apside tudi oltarna niša ali zadnji, zgornji polkrožni del oltarja. Apsida. (Pridobljeno 2010).

Kapela ali cerkev - kdaj je neko svetišče kapela, kdaj cerkev, je zelo težko opredeliti. Običajno se zanašamo na lokalno poimenovanje oziroma, pod katerim imenom se svetišče pojavlja v literaturi. Kakšnih uradnih kriterijev glede na velikost ni, čeprav vemo, da zna biti včasih kakšna kapela večja od neke vaške cerkvice. Prav tako ne moremo reči, da kot razločevalni element služi zvonik ali zakristija. Mogoče je edina pomembna razlika v osrednjem prostoru. Kadar sta ladja in prezbiterij arhitekturno ločena stavbna člena, lahko govorimo o cerkvi, če pa je prostor povsem enovit, gre za kapelo. Ločenost prostorov se kaže v tlorisu, pri čemer je prezbiterij ožji in krajši. Slednji ima tla vsaj za eno ali par stopnic višja, ob strani je ločen z zidcema, ki se pogosto pod stropom polkrožno sprimeta, in kot zadnje, ima svoj strop, tako da ima npr. lastno kupolo ali obokan strop. Seveda tudi to niso dokončni klasifikatorji in če že, veljajo za starejša svetišča, medtem, ko so moderna svetišča grajena povsem izven tradicionalnih slogov. Kapela. (Pridobljeno 2010).

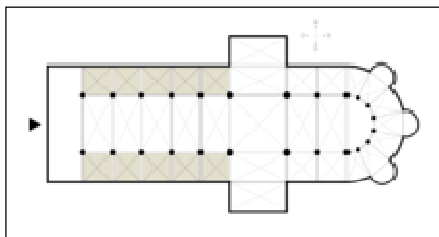
Cerkvena ladja označuje večji prostor v notranjosti cerkve. Cerkev ima lahko glavno (vzdolžno) ladjo, prečno ter stranske ladje.

Glavna ladja (Slika 4) je običajno največji del cerkve. Je podolgovate oblike in sega od vhodnega dela cerkve (narteksa) do prezbiterija ali do transepta. V glavni ladji so običajno sedeži - klopi za vernike. Cerkevna ladja. (Pridobljeno 2010).



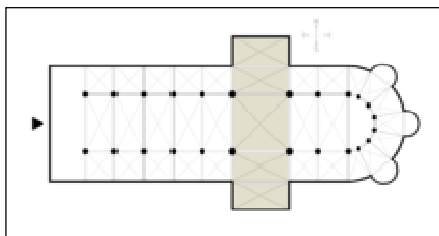
Slika 4: Glavna ladja

Stranski ladji (Slika 5) potekata vzporedno z glavno ladjo, na njeni levi in desni strani. Običajno sta ožji in zaradi arhitektonskih zakonitosti nižji od glavne ladje ter od le-te ločeni s stebri. V stranskih ladjah so lahko sedeži za vernike, pogosto pa so tam tudi stranski oltarji in spovednice. Nekatere večje cerkve imajo tudi več stranskih ladij na vsaki strani.



Slika 5: Stranski ladji

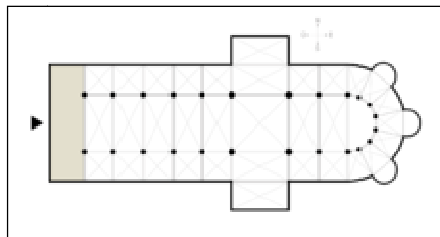
Prečna ladja ali transept (Slika 6) je del cerkve, ki poteka pravokotno na glavno ladjo in loči glavno ladjo od prezbiterija. Nad mestom, kjer se križata glavna in prečna ladja, pogosto stoji osrednja kupola. Večje cerkve imajo lahko tudi več prečnih ladij.



Slika 6: Prečna ladja

Zvonik (tudi stolp z zvonom) je gradbeni objekt, največkrat sestavni del cerkve, z veliko višino v primerjavi s svojo tlorisno površino. S svojo višino pogosto izstopa iz celotne zasnove konstrukcije, prav tako izstopa njegova vitkost, ki je precej večja glede na ostale konstrukcijske sklope. V preteklosti so za gradnjo zvonika največkrat uporabljali kamen ali pa opeko. Danes se gradijo večinoma betonski zvoniki, v katerem je en ali več zvonov. Zvonik lahko stoji samostojno ali pa je povezan s cerkvijo oziroma kapelo, ob sami cerkvi pa sta lahko tudi dva zvonika. Zvonik. (Pridobljeno 2010).

Narteks (starogrška beseda: νάρθηξ [nartheks] = skrinjica, omarica) (Slika 7) v cerkveni arhitekturi pomeni preddverje ali vhodno lopo pri cerkvah starejšega tipa. Običajno pomeni narteks tisti del cerkve, ki je tik ob vhodu. To je hkrati tudi del cerkve, ki je najbolj oddaljen od glavnega oltarja. V nekaterih cerkvah ločimo zunanji narteks (vhodna lopa pred cerkvijo) in notranji narteks (vhodni del v cerkvenem poslopju). Narteks. (Pridobljeno 2010).



Slika 7: Narteks

Portal je bogato arhitekturno zasnovan in kamnoseško ali kiparko okrašen vhod. (Pridobljeno 2010).

Oltar je vsaka struktura, namenjena opravljanju daritev v religiozne namene. V mnogoboštvu je to navadno dvignjen objekt za žrtvovanje bogovom, v katoliški in pravoslavni cerkvi je oltar najsvetejši del cerkve, ob katerem duhovnik mašuje. Oltar. (Pridobljeno 2010).

4 MEHANIZMI PORUŠITVE SAKRALNIH OBJEKTOV

Poškodbe, ki nastanejo ob potresni obremenitvi na sakralnih objektih se močno razlikujejo od poškodb, ki se pojavljajo pri enostavnih zidanih objektih.

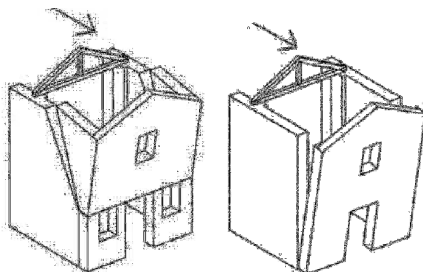
Za lažje razumevanje vzrokov nastanka poškodb na obravnavanih sakralnih objektih ob potresih, ki so se zgodili v Posočju, so v nadaljevanju opisani mehanizmi porušitev z značilnimi poškodbami ter njihovi vzroki (Cecchi et al. 2005, Bosiljkov et al. 2009).

4.1 Prevrnitev fasade

Poškodbe (slika 8): separacija fasade od stranskih zidov v bližini vogalov ali v obliki ukrivljenih razpok po višini stranskih zidov.

Ranljivost:

- Slaba povezanost fasadnih in stranskih zidov.
- Premalo vzdolžnih sider in letečih opornikov.
- Pravilna zidarska zveza in obstoj vogalnikov.



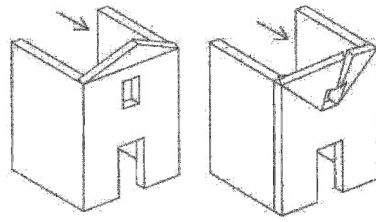
Slika 8: Prevrnitev fasade

4.2 Prevrnitev zatrepnega dela fasade

Poškodbe (slika 9): razpadanje in poškodbe zatrepnega dela fasade.

Ranljivost:

- Prisotnost širokih odprtin (oken), katere lahko poslabšajo fasadni zid.
- Slaba povezanost s streho.



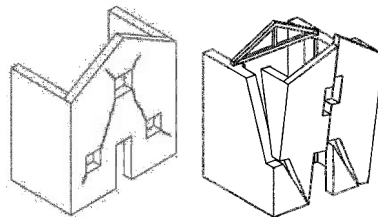
Slika 9: Prevrnitev zatrepnega dela fasade

4.3 Strižne poškodbe v ravnini fasade

Razpoke v fasadi (slika 10); karakteristične križne oblike, centralne vertikalne razpoke, ločne razpoke v bližini vogalov.

Ranljivost:

- Prisotnost širokih odprtin, katere lahko poslabšajo fasadni zid.
- Streha sloni na stranskih zidovih in pomanjkanje prečnih zidnih vezi.



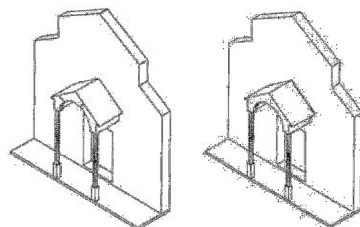
Slika 10: Strižne poškodbe v ravnini fasade

4.4 Poškodbe narteksa (preddverje)

Razpoke v fasadi na kontaktu z narteksom (slika 11), razpokanost čelnega zidu narteksa.

Ranljivost:

- Naknadno pozidano preddverje – slaba povezava s fasadnim zidom.
- Premalo zidnih vezi.



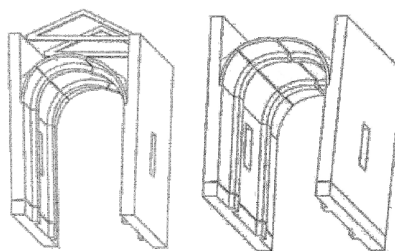
Slika 11: Poškodbe narteksa (preddverje)

4.5 Prečne vibracije vzdolžne ali prečne ladje

Razpoke v lokih (obokanih elementih) (slika 12), rotacija stranskih zidov s tlačno porušitvijo ali odpiranjem razpok v spodnjem delu (osnovici) stebrov.

Ranljivost:

- Stranski zidovi preveč ozki.
- Pomanjkanje prečnih zidnih vezi ali stranskih opornikov.



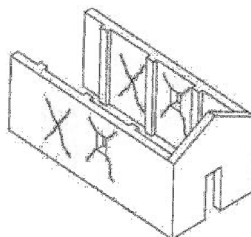
Slika 12: Prečne vibracije vzdolžne ali prečne ladje

4.6 Strižne razpoke v vzdolžnih zidovih

Razpoke v zidovini v naklonu (slika 13), včasih nepovezane zaradi prisotnosti odprtín, ki so včasih zazidane.

Ranljivost:

- Zidovina slabe kakovosti ali pretanki zidovi.
- Poslabšanje nosilnosti zaradi prisotnosti odprtín v zidovih.



Slika 13: Strižne razpoke v vzdolžnih zidovih

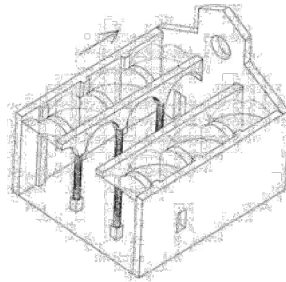
4.7 Vzdolžne vibracije glavne ladje

Razpoke v vzdolžnih lokih (slika 14), drobljenje ali odpiranje razpok v podnožju stebrov, diagonalne strižne razpoke v cerkveni ladji.

Ranljivost:

- Ozki stebri in glavna ladja bistveno višje postavljena v primerjavi s stranskimi ladjami.

- Pomanjkanje vzdolžnih zidnih vezi.



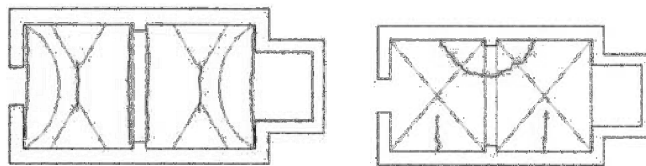
Slika 14: Vzdolžne vibracije glavne ladje

4.8 Oboki glavne ladje

Razpoke v obokih (slika 15), odstopanje obokov od zaključnih lokov.

Ranljivost:

- Oboki preveč plitki in/ali preveč tanki (premajhen prečni prerez).
- Prisotna koncentrirana obtežba od strehe (uležani leseni nosilci strešne konstrukcije).



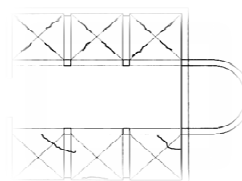
Slika 15: Oboki glavne ladje (banjasti obok levo in križni obok desno)

4.9 Prečna ladja in oboki

Razpoke v obokih (slika 16), odstopanje obokov od zaključnih lokov.

Ranljivost:

- Oboki preveč plitki in/ali preveč tanki (premajhen prečni prerez).
- Prisotna koncentrirana obtežba od strehe (uležani leseni nosilci strešne konstrukcije).



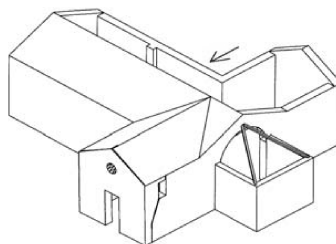
Slika 16: Prečna ladja in oboki

4.10 Prevrnitev zaključnega (fasadnega) zidu prečne ladje

Poškodbe: separacija fasade od stranskih zidov v bližini vogalov ali v obliki ukrivljenih razpok po višini stranskih zidov (slika 17). Prevrnitev zatrepnega dela in timpanona (ločnega polja na romanskih in gotških portalih).

Ranljivost:

- Prisotnost večjih odprtín v zaključnem in stranskem zidu.
- Večji zatrepni zidovi neobremenjeni zaradi strešne konstrukcije.



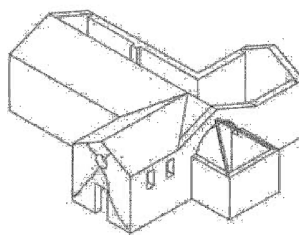
Slika 17: Prevrnitev zaključnega (fasadnega) zidu prečne ladje

4.11 Ravninska (strižna) porušitev zaključnega zidu prečne ladje

Poškodbe: separacija fasade od stranskih zidov v bližini vogalov ali v obliki ukrivljenih razpok po višini stranskih zidov (slika 18). Prevrnitev zatrepnega dela in timpanona.

Ranljivost:

- Prisotnost večjih odprtín v zaključnem in stranskem zidu.
- Prisotne zidne vezi, zaključek v obliki preklade ali zaključnega loka.



Slika 18: Ravninska (strižna) porušitev zaključnega zidu prečne ladje

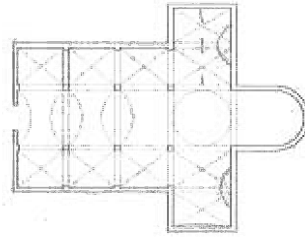
4.12 Oboki prečne ladje

Poškodbe: ločitev obokov od stranskih zidov (slika 19).

Ranljivost:

- Prisotnost zidnih vezi.

- Oboki z vmesnimi odprtinami za osvetlitev prečne ladje.



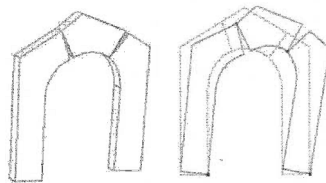
Slika 19: Oboki prečne ladje

4.13 Slavolok (triumfalni lok)

Poškodbe: formiranje členkov v loku, odpiranje razpok, drobljenje zidovine in zdrs med kamni (slika 20).

Ranljivost:

- Debelina loka je premajhna ali je zidovina slabe kakovosti.
- Pomanjkanje ali nepravilna postavljenost zidnih vezi, nezadostna podpora stranskih zidov.



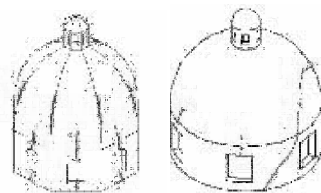
Slika 20: Slavolok (triumfalni lok)

4.14 Kupola – boben kupole

Poškodbe: formiranje kontinualnih ločnih razpok v kupoli, razpoke v bobnu kupole (slika 21).

Ranljivost:

- Boben je zelo visok in vitek (z velikimi odprtinami).
- Pomanjkanje prstanov ali zunanjih lebdečih opornikov.



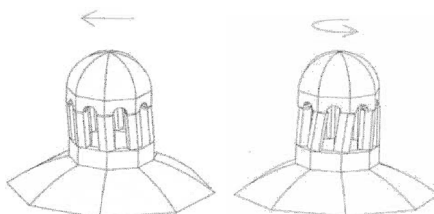
Slika 21: Kupola – boben kupole

4.15 Laterna

Poškodbe: premiki ali rotacija (slika 22).

Ranljivost:

- Visoka laterna z velikimi odprtinami in vitkimi stebri.



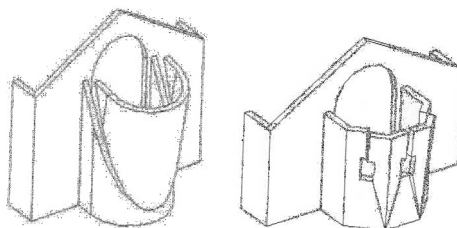
Slika 22: Laterna

4.16 Prevrnitev in poškodbe apside

Poškodbe: vertikalne razpoke na rasterju oken, ločne razpoke (slika 23).

Ranljivost:

- Pomanjkanje prstanov ali vzdolžnih zidnih vezi.
- Pretežka streha ali prav nasprotno - prelahka streha zaradi velikih odprtin.



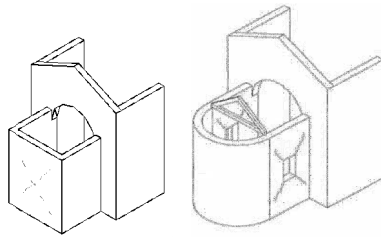
Slika 23: Prevrnitev in poškodbe apside

4.17 Strižne razpoke prezbiterija oziroma apside

Poškodbe: strižne razpoke (v eni smeri ali križne) (slika 24). Diskontinuiteta zidovja.

Ranljivost:

- Pomanjkanje zidnih vezi, prerazporeditev strešne obtežbe.
- Prisotnost velikih odprtin, zidovi relativno tanko podprti na veliki razdalji.



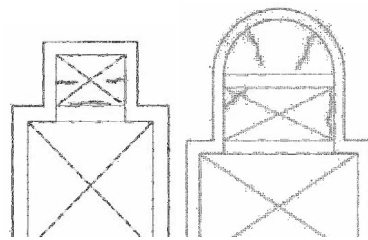
Slika 24: Strižne razpoke prezbiterja oziroma apside

4.18 Oboki prezbiterja oziroma apside

Poškodbe: razpoke v obokih ob križanju in ob zidovih (slika 25).

Ranljivost:

- Koncentrirana obtežba strešne konstrukcije.
- Prisotnost velikih odprtín, zidovi relativno tanki.



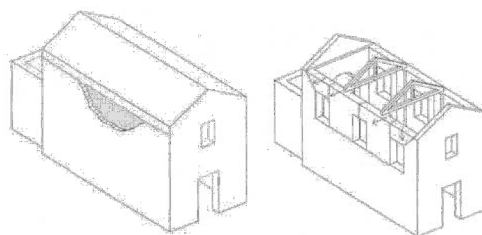
Slika 25: Oboki prezbiterja oziroma apside

4.19 Streha – glavna ladja

Poškodbe: razpoke v bližini ali neposredno pod vgrajeno AB vezjo (slika 26). Izrivanje poslabšanih (zaradi odprtín) zidov ladje pod nivojem strehe.

Ranljivost:

- Pomanjkanje sider na kontaktu zaključna vez – zidovina.
- Povečana teža in togost strehe (naknadna vgraditev AB plošče)
-



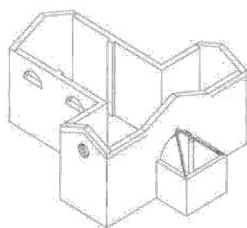
Slika 26: Streha - glavna ladja

4.20 Streha – prečna ladja

Poškodbe: vodoravni zdrs v zidovini pod nivojem strehe, razpoke (odpiranje stika) med strešno konstrukcijo in zidovjem, premiki strehe (slika 27).

Ranljivost:

- Možnost vodoravnih premikov strešne konstrukcije.
- Prisotnost zidnih vezi, težke strehe.



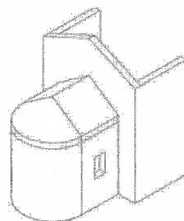
Slika 27: Streha – prečna ladja

4.21 Streha – apsida oziroma prezbiterij

Poškodbe: vodoravni zdrs v zidovini pod nivojem strehe, razpoke (odpiranje stika) med strešno konstrukcijo in zidovjem, premiki strehe (slika 28).

Ranljivost:

- Možnost vodoravnih premikov strešne konstrukcije.
- Prisotnost zidnih vezi, težke strehe.



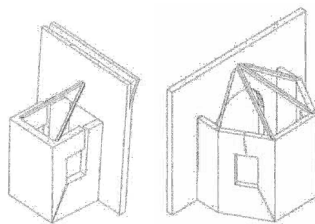
Slika 28: Streha – apsida oziroma prezbiterij

4.22 Prevrnitev kapele

Poškodbe: strižne razpoke (v eni smeri ali križne) (slika 29). Diskontinuiteta zidovja.

Ranljivost:

- Sprememba v togosti zidov.
- Prisotnost večjih odprtín v zidovih



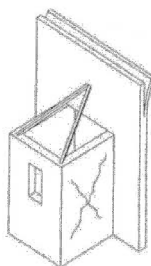
Slika 29: Prevrnitev kapele

4.23 Strižne razpoke kapele

Poškodbe: ločitev vzdolžnih in prečnih zidov (slika 30).

Ranljivost:

- Pomanjkanje zidnih vezi, prerazporeditev strešne obtežbe.
- Prisotnost velikih odprtin, zidovi relativno tanki in podprti na veliki razdalji.



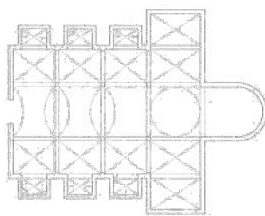
Slika 30: Strižne razpoke

4.24 Oboki kapele

Poškodbe: razpoke v obokih ob križanju in ob zidovih (slika 31).

Ranljivost:

- Koncentrirana obtežba strešne konstrukcije.
- Prisotnost velikih odprtin (odprtine znižane), zidovi relativno tanki.



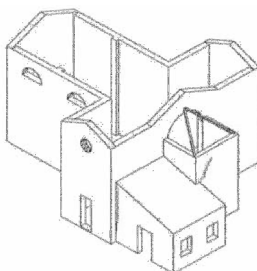
Slika 31: Oboki kapele

4.25 Sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije

Poškodbe: zaradi različnega delovanja posameznih sklopov konstrukcije pri dinamični obtežbi (slika 32).

Ranljivost:

- Velike razlike v globalni togosti posameznih sklopov (tudi materiala).
- Pomanjkanje zidnih zvez oziroma zidnih vezi na stiku različnih sklopov.



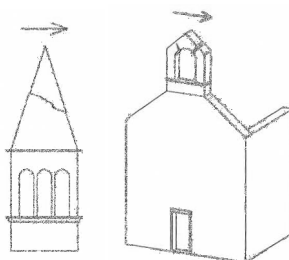
Slika 32: Sodelovanje med posameznimi deli konstrukcije

4.26 Prevrnitev izpostavljenih elementov (zvonik na preslico, koničaste strehe zvonikov, itd.)

Poškodbe: globalna trajna rotacija ali zdrs, razpoke ob vznožju elementov (slika 33).

Ranljivost:

- Pomanjkljivo sidranje v osnovno konstrukcijo cerkve.
- Elementi preveč tanki.
-



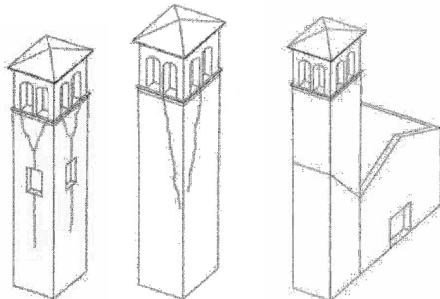
Slika 33: Prevrnitev izpostavljenih elementov

4.27 Stolp zvonika

Poškodbe: razpoke ob stiku s cerkvijo, vertikalne razpoke pod zvonikom, razpoke pod zvonikom na rastru odprtin (slika 34).

Ranljivost:

- Stolp zvonika in zidovi so pretanki.
- Zidovina slabe kakovosti in odsotnost povezanosti zidov.



Slika 34: Stolp zvonika

4.28 Zvonica, prostor pod zvonikom

Poškodbe: razpoke v vokih, zasuk in zdrs stebričkov (Slika 35).

Ranljivost:

- Pomanjkanje zidnih vezi in prstanov.
- Pretanki stebri in streha pretežka (pretoga).



Slika 35: Zvonica, prostor pod zvonikom

5 ANALIZE POTRESNE ODPORNOSTI SAKRALNIH OBJEKTOV

Analiza potresne odpornosti v tem diplomskem delu je bila narejena na štirih cerkvah v Zgornjem Posočju. Za cerkve na obravnavnem območju sem se odločila, ker so se zaradi trikratne ponovljivosti potresa na tem območju v zadnjih desetletjih pokazale značilne poškodbe sakralnih objektov. Potresna aktivnost Zgornjega Posočja je opisana v poglavju Potresi v zgornjem Posočju (6).

Obravnavane cerkve so sveti Urh v Bovcu, sveti Anton v Kobaridu, sveti Anton Puščavnik v Čezsoči in sveta devica Marija v Polju.

V analizi posamezne cerkve je najprej podan njen opis iz registra kulturne dediščine ter splošni opis, nato zasnova konstrukcije, analiza poškodb in seizmična analiza, narejena z računalniškim programom 3Muri in v dveh primerih s programom Sremb.

Iz registra kulturne dediščine je podana evidenčna številka enote, datacija objekta in obdobje izgradnje. Register nepremičnin kulturne dediščine se ureja s Pravilnikom o registru kulturne dediščine, ki je bil objavljen v Uradnem listu Republike Slovenije (št. 25/2002). Ta pravilnik ureja vsebino registra nepremične kulturne dediščine, postopek vpisa kulturne dediščine v register nepremične kulturne dediščine, njegovo vodenje in uporabo.

Splošni opis in zasnova konstrukcije sta bila zasnovana na podlagi grafičnih podlog, slik, literature, spletnih strani in samega ogleda objektov. Z dejanskim ogledom objektov smo pridobili pomembne informacije in dejansko predstavo o tipologiji objekta. Takšni objekti imajo namreč precej večje dimenzije elementov v primerjavi s sedanjo gradnjo. Dober primer je debelina zidov, ki je pri cerkvah od 0,8 do 1,25 m medtem, ko so današnji zidovi z uporabo modernih materialov veliko tanjši, saj na primer v betonu trdnost zidu povečujemo z uporabo armature.

Analiza poškodb je bila narejena na podlagi katastra poškodb za posamezno fasado. Opazovali smo razpoke in na njihovi podlagi skušali prepoznati za sakralne objekte tipične poškodbe ter

mehanizme porušitve. Mehanizmi porušitve, ki se pojavljajo pri sakralnih objektih so opisani v poglavju Mehanizmi porušitve sakralnih objektov (4).

Seizmična analiza je bila narejena s programom Sremb in z razmeroma novim programom 3Muri. Podrobno delovanje obeh programov je v nadaljevanju obrazloženo v poglavju Računalniška programa Sremb in 3Muri (8).

Za izdelavo seizmične analize je potrebno poznati vplive obtežb, ki delujejo na objekte. Vplivi obtežb kot so stalna/lastna, spremenljiva in potresna obtežba, predpisani po veljavnem standardu za izračun potresne odpornosti stavb EC8, so podrobno opisani pod poglavjem Obtežbe in material (7). Ker se obravnavani objekti nahajajo na potresno aktivnem področju Posočja, je v naslednjem poglavju Potresi v zgornjem Posočju (6) opisana tudi tamkajšnja seizmična dejavnost, iz katere izhajajo tudi predpisani projektni pospeški tal za to območje.

6 POTRESI V ZGORNJEM POSOČJU

V diplomski nalogi je bila narejena seizmična analiza sakralnih objektov, ki stojijo v Zgornjem Posočju na območju, kjer so se tla močnejše zatresla tri krat v zadnjih nekaj desetletjih, in sicer v letih 1976, 1998 in 2004.

Nekaj sakralnih objektov je v teh potresih utrpelo poškodbe. Po informacijah, ki jih zbira Tehnična pisarna v Bovcu je bilo po potresu leta 2004 poškodovanih 39 sakralnih objektov, med katere uvrščajo tudi župnišča in mrliške vežice, v potresu leta 1998 pa je bilo poškodovanih 76 sakralnih objektov.

V nadaljevanju so opisani vsi omenjeni potresi, povzeti po ARSO.

6.1 Potres v Zgornjem Posočju leta 1976

Potresi, ki so v maju in septembru leta 1976 prizadeli severovzhodno Italijo, predvsem Furlanijo, so imeli posledice tudi v severozahodni Sloveniji. Nastala je ogromna gmotna škoda tako v Posočju kot tudi drugod v severozahodni Sloveniji.

Glavna potresna sunka sta nastala v maju (6. maj, magnituda 6,5) in septembru (15. september, magnituda 6,1). Prvi potresni sunek je dosegel največje učinke med IX. in X. stopnjo (ponekod z dodatnimi lokalnimi učinki celo X. stopnjo po EMS – European Macroseismic Scale), drugi pa IX. stopnjo po EMS (skupni učinki so dosegli X. stopnjo). Globina žarišč je bila med 10 in 15 km.

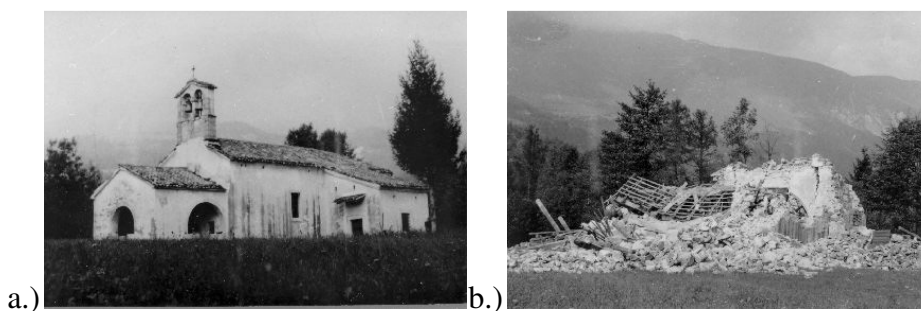
Največje učinke, VIII. stopnjo po EMS, je potres dosegel v Breginjskem kotu, v Kobaridu med VII. in VIII. stopnjo po EMS. Za Bovec ni podatka, vendar glede na oddaljenost od Breginjskega kota lahko sklepamo, da je bila stopnja primerljiva s Kobaridom (lokacijsko označeno na Slika 36). Septembrski potres je imel nekoliko nižjo intenziteto potresa.



Slika 36: Breginski kot ter Posočje na karti Slovenije - zemljevid. (Pridobljeno 2010).

Skupno število zelo poškodovanih objektov ob majskih in septembrskih potresih je bilo okoli 4000. To so bili objekti, ki jih je bilo treba podreti ali so bili porušeni že med potresoma. Skupno število vseh poškodovanih objektov je bilo 12000.

Da je bi potresni sunek res močan, dokazuje porušitev sakralnega objekta v Podbeli (Slika 37).



Slika 37: a.) cerkev v Podbeli pred potresom, b.) po potresu. Potres 1976.(Pridobljeno 2010)

6.2 Potres v Zgornjem Posočju leta 1998

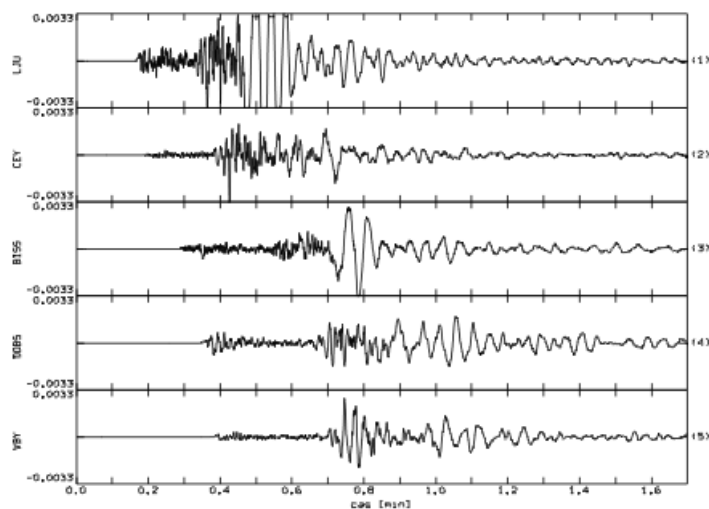
Potres v Zgornjem Posočju leta 1998 velja za enega izmed najmočnejših potresov 20. stoletja z žariščem na slovenskem ozemlju. Njegova magnituda je bila 5,6, največji potresni učinek je

dosegel med VII. in VIII. stopnjo po EMS. Žarišče potresa je nastalo med dolino Lepene in Krnskimi gorovjem v globini okoli 8 km.

Potres je poleg velike gmotne škode na objektih v Bovškem, Kobariškem in Tolminskem povzročil tudi precejšnje spremembe v naravi, saj so nastali številni skalni podori, ki so ponekod popolnoma uničili planinske poti.

Potres 12. aprila so čutili prebivalci celotne Slovenije in prebivalci nekaterih predelov devetih sosednjih držav. V prvih 20 urah po glavnem potresu je bilo več kot 400 potresnih sunkov, v naslednjih mesecih pa več kot 9000. Najmočnejši potresni sunek je nastal 6. maja z magnitudo 4,2. Ob potresu je bilo poškodovanih več kot 4000 objektov.

Slika 38 prikazuje zapis potresa v zgornjem Posočju 12. aprila 1998 ob 10. uri in 55 minut po svetovnem času na vertikalnih komponentah petih digitalnih opazovalnic slovenske državne mreže.



Slika 38: Zapis potresa v zgornjem Posočju, 12. aprila 1998. Potres 1998. (Pridobljeno 2010)

6.3 Potres v Zgornjem Posočju leta 2004

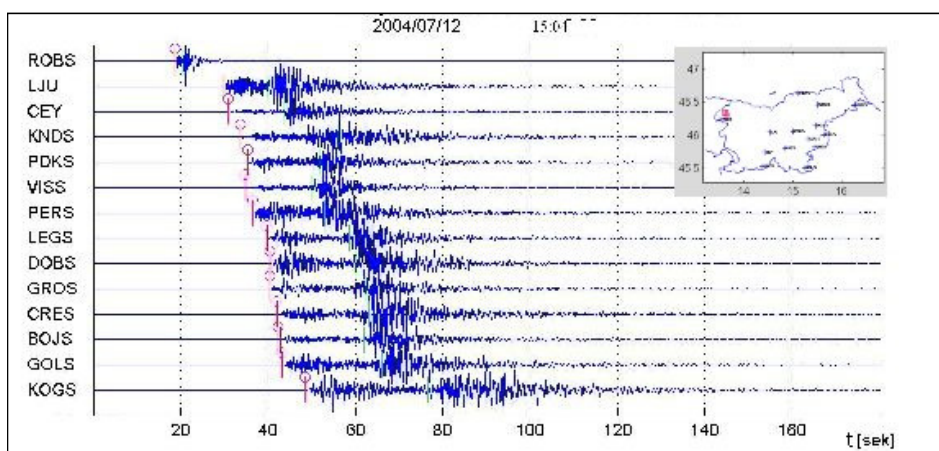
Žarišče potresa, ki se je sprožil 12. junija, je bilo globoko okoli 8 km pod površino. Nastalo je ob istem prelomnem sistemu kakor potres 12. aprila 1998, to je ob Ravenskem prelomu, ki je del Idrijskega prelomnega sistema.

Magnituda 4,9 je bila izračunana iz zapisov 11-tih opazovalnic. Preliminarne učinke na zgradbe, naravo, ljudi in predmete smo ocenili z intenziteto med VI. in VII. stopnjo po evropski potresni lestvici (EMS).

Potres so čutili po vsej državi in tudi v sosednjih državah. Najbolj pa so potres občutili prebivalci na Bovškem, tam je bilo tudi največ gmotne škode. Potres je bil zabeležen na 17-tih od 18-tih delujočih opazovalnic nove državne mreže potresnih opazovalnic.

V prvih dneh po glavnem potresu je sledilo nekaj sto popotresnih sunkov, v začetku tudi po pet na minuto. Večinoma so bili šibki, pa vendar je nastalo tudi nekaj po-potresov, ki so presegli magnitudo 3.

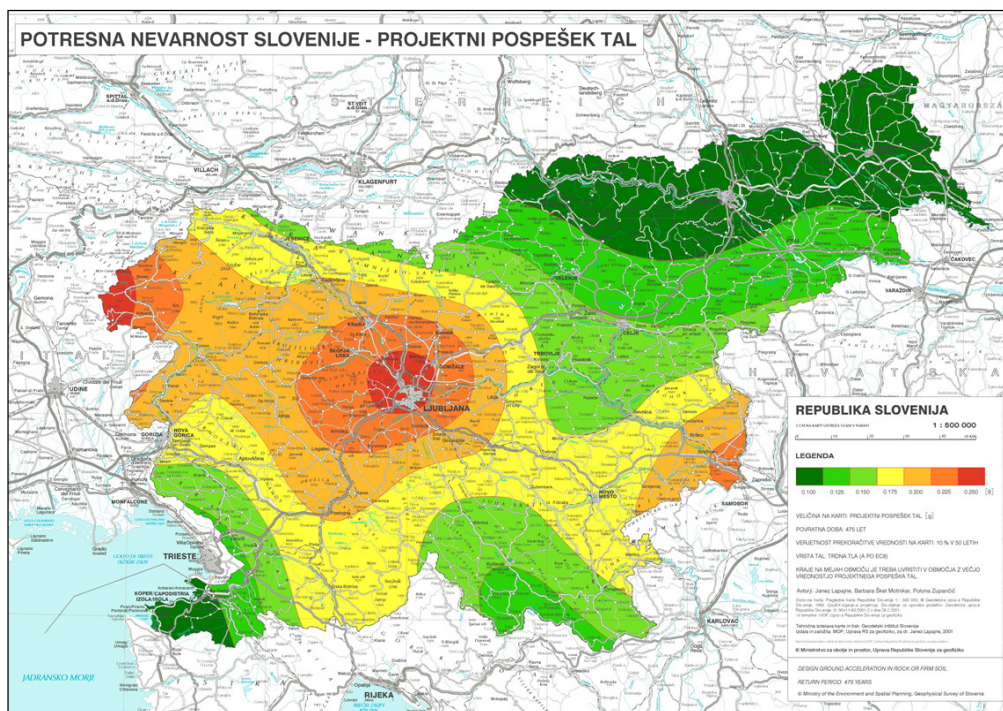
Zapis glavnega potresa 12. junija 2004 na delujočih opazovalnicah državne mreže potresnih opazovalnic je prikazan na Slika 39. Rdeča črta kaže prihod primarnih valov, zelena sekundarnih valov, avtomatski izračun epicentra pa je na sliki desno zgoraj.



Slika 39: Zapis potresa v zgornjem Posočju, 12. junija 2004. Potres 2004. (Pridobljeno 2010).

6.4 Potresni pospešek tal

Potresni pospešek tal za povratno dobo 475 let razberemo iz Temeljne karte potresne nevarnosti Slovenije (Slika 40), ki je izdelana v skladu z zahtevami evropskega predstandarda Eurocode 8 (EC8). Projektni pospešek tal (angl. *design ground acceleration*) je po EC8 enak največjemu pospešku tal oz. absolutna vrednost zapisa pospeška na prostem površju. Zapis pospeška je korigiran tako, da so izločeni šumi in napake inštrumentov.



Slika 40: Temeljna karta potresne nevarnosti Slovenije. Karta. (Pridobljeno 2010).

Na podlagi potresnih sunkov oziroma pospeškov, ki so opisani v zgornjih točkah za vse tri potrese v Posočju smo ugotovili, da se velikost dejanskega potresnega pospeška tal ujema s potresnim pospeškom tal za povratno dobo 475 let, ki ga razberemo iz Temeljne karte potresne nevarnosti Slovenije. Na podlagi te ugotovitve je bil za izračun potresne obtežbe uporabljen potresni pospešek tal iz Temeljne karte potresne nevarnosti v Sloveniji.

7 OBTEŽBE IN MATERIAL

Za izvršitev seizmične analize je potrebno poznati vse vplive obtežb in materialne lastnosti zidovine. Vplivi obtežb so: stalna ali lastna obtežba, spremenljiva obtežba in potresna obtežba. Na obravnavanih cerkvah niso bili izvedeni in-situ preizkusi za pridobitev dejanskih materialnih lastnosti objektov. Zaradi tega so bile materialne lastnosti zidovine povzete iz veljavnega italijanskega standarda na področju preverjanja potresne odpornosti zidanih stavb (OPCM 2003) in iz Tehnične pisarne v Bovcu (Gostič et al. 2008)

7.1 Obtežbe

Pri vseh seizmičnih analizah so bile uporabljene enake obtežbe, saj analizirani sakralni objekti izhajajo iz enakega območja.

7.1.1 Stalna/lastna obtežba

Za izračun stalne ali lastne obtežbe je potrebno poznati specifične teže uporabljenih materialov. Enotne specifične teže, ki so bile uporabljene, so prikazane v preglednici 1.

Preglednica 1: Specifične teže uporabljenih materialov

Material	Specifična teža
Kamnito zidovje	19 kN/m ³
Les	7 kN/m ³
Beton	22 kN/m ³

Specifično težo potrebujemo za izračun lastne površinske obtežbe stropnih plošč in za izračun lastne teže strešne konstrukcije, ki se prenese na zidove kot linijska obtežba.

7.1.2 Spremenljiva obtežba

Spremenljiva obtežba pri seizmični analizi v diplomskem delu obravnavanih sakralnih objektov ni bila upoštevana, saj se obtežba snega in vetra v obtežni kombinaciji za potres po

Evrokodu ne upoštevata. Prav tako ni bila upoštevana koristna obtežba na stropovih, saj so ti v sakralnih objektih večinoma nepohodni.

7.1.3 Potresna obtežba

Za območje Bovca in tip obravnavanih objektov so bili upoštevani naslednji parametri:

- $\gamma = 1,2$ - objekt spada v III. kategorijo pomembnosti (stavbe, katerih potresna odpornost je pomembna glede na posledice porušitve npr. šole, dvorane za srečanja itd), zato projektiramo na povratno dobo 780 let (SIST EN 1998-1:2004)
- $a_{gR} = 0,225g$ - projektni pospešek tal, ki ga razberemo iz Temeljne karte potresne nevarnosti Slovenije
- tip tal A – skala ali druga skali podobna geološka formacija, na kateri je največ 5 m slabšega površinskega materiala.

Projektni pospešek tal, ki je bil uporabljen pri tej diplomski nalogi je bil razbran iz Temeljne karte potresne nevarnosti Slovenije, ki je opisana pod poglavjem Potresi v zgornjem Posočju (6).

Elastični spekter odziva $S_e(T)$ je po členu 3.2.2.2 v Evrokodu 8-1 opredeljen z enačbami:

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} (2,5 \cdot \eta - 1) \right], \quad (7.1)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = 2,5 \cdot a_g \cdot S \cdot \eta, \quad (7.2)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = 2,5 \cdot a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right), \quad (7.3)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = 2,5 \cdot a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right), \quad (7.4)$$

kjer so:

T nihajni čas linearnega sistema z eno prostosno stopnjo,

a_g projektni pospešek za tla tipa A ($a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$),

η faktor za korekcijo vpliva dušenja z referenčno vrednostjo $\eta = 1$ pri 5 % viskoznega dušenja.

Vrednosti parametrov, ki opisujejo elastični spekter odziva tipa tal A po nacionalnem dodatku (SIST EN 1998-1: 2005/A101), so:

$$S = 1,0 \quad T_B = 0,10 \text{ s} \quad T_C = 0,4 \text{ s} \quad T_D = 2,0 \text{ s}$$

7.2 Material

Materialne lastnosti, ki jih potrebujemo za izračun nosilnosti zidov so elastičen modul E , strižni modul G , tlačna trdnost f_m in strižna trdnost τ_0 . Materialne lastnosti, ki so bile uporabljene v diplomskem delu, so bile pridobljene iz dveh virov. Prvi vir je Italijanski nacionalni standard (OPCM 2003) za objekte na seizmičnih področjih (preglednica 2). Za ta vir smo se odločili, ker ima program 3Muri, s katerim smo naredili seizmične analize, v svoji bazi podobne materialne karakteristike. Te se pridobljene na podlagi vrste analiziranih objektov Italiji. Drugi vir so podatki iz Tehnične pisarne v Bovcu (Gostič et al. 2008), dobljeni na osnovi in-situ in laboratorijskih preiskav več zvrst zidovin s tega območja (preglednica 3). Potrebno se je zavedati, da so dejanske materialne lastnosti sakralnih objektov veliko boljše od podatkov iz literature, saj so se za izgradnjo teh objektov uporabljali kamni pravih oblik in kakovostni materiali.

Materialne lastnosti iz italijanskega pravilnika veljajo za zid iz neobdelanega kamnja z omejeno debelino in polnim jedrom. V primeru, ko je zid injektiran, materialne lastnosti neinjektiranega zidu po standardu pomnožimo s faktorjem 1,70 - za toliko naj bi se izboljšali tako trdnosti zidu, kot tudi togost.

Preglednica 2: Materialne lastnosti zidov – OPCM 2003

Material	$f_m(\text{N/cm}^2)$	$\tau_0(\text{N/cm}^2)$	$E(\text{N/mm}^2)$	$G(\text{N/mm}^2)$
Neinjektirano - min	200	3,5	1020	340
Neinjektirano - max	300	5,1	1440	480
Injekt-cementna - min	340	5,95	1734	578
Injekt-cementna - max	510	8,67	2448	816

Preglednica 3: Materialne lastnosti zidov– Tehnična pisarna v Bovcu

Material	$f_m(\text{N/cm}^2)$	$\tau_0(\text{N/cm}^2)$	$E(\text{N/mm}^2)$	$G(\text{N/mm}^2)$
Neinjektirano	175	4,7	780	110
Injektirano	200	14,0	1500	450

V skladu z Evrokodom 8-3 (SIST EN 1998-3, 2005) se pri preverjanju potresne odpornosti uporabljajo mehanske lastnosti, ki so določene v skladu z ravni poznavanja konstrukcije. Obseg podatkov o konstrukciji je odvisen od dostopne dokumentacije o konstrukciji, poznavanja terena, geometrijskih in mehanskih karakteristik sestavnih materialov konstrukcije ter poznavanja povezanosti elementov, torej od obsega opravljenih preiskav konstrukcije.

Evrokod 8-3 loči tri ravni poznavanja konstrukcije (angl. *knowledge level (KL)*), od katerih je odvisen faktor zaupanja (angl. *confidence factor (CF)*):

- KL1: omejeno poznavanje ($CF = 1,35$)
- KL2: običajno poznavanje ($CF = 1,20$)
- KL3: popolno poznavanje ($CF = 1,0$)

Glede na poznavanje objektov, ki so obravnavani v diplomskem delu, so materialne lastnosti deljene s faktorjem zaupanja 1,35, saj je naše poznavanje omejeno. V preglednicah 4 in 5 so prikazane materialne lastnosti, ki so bile upoštevane pri izračunih.

Preglednica 4: Materialne lastnosti ob upoštevanju CF – OPCM 2003

Material	$f_m(\text{N/cm}^2)$	$\tau_0(\text{N/cm}^2)$	$E(\text{N/mm}^2)$	$G(\text{N/mm}^2)$
Neinjektirano - min	148	2,6	1020	340
Neinjektirano - max	222	3,8	1440	480
Injek-cementna - min	252	4,4	1700	580
Injek-cementna - max	378	6,4	2450	820

Preglednica 5: Materialne lastnosti ob upoštevanju CF – Tehnična pisarna v Bovcu

Material	$f_m(\text{N/cm}^2)$	$\tau_0(\text{N/cm}^2)$	$E(\text{N/mm}^2)$	$G(\text{N/mm}^2)$
Neinjektirano	130	3,5	780	110
Injektirano	148	10,4	1500	450

8 RAČUNALNIŠKA PROGRAMA SREMB IN 3MURI

Zaradi zapletenosti nelinearne dinamične analize obstaja na tržišču več računalniških programov, ki temeljijo na poenostavljenih metodah nelinearne statične analize. V diplomski nalogi sta bila za oceno potresne odpornosti analiziranih sakralnih objektov uporabljena programa Sremb in 3Muri, katerih delovanje in predpostavke so opisane v nadaljevanju.

Obstaja več različnih pristopov k modeliranju zidanih objektov. Izbor primerne metode modeliranja zgodovinskih zidanih konstrukcij zaradi velikega nabora različnih materialov, geometrije, gradbenih detajlov in (ne)poznavanja konstrukcije predstavlja zelo težavno nalogo.

V spodnji tabeli je prikazana uporaba različnih tipov modeliranja zidanih konstrukcij glede na arhitektonske razrede stavb, kjer pomeni CCLM »Continuum constitutive model« (MKE Makro-modeliranje), SEM »Structural elements model« (Model konstrukcijskih elementov), DIM »Discrete interface model« (Diskretni model z uporabo stičnih elementov), MBM pa »Macro-blocks model« (Kinematični model ob upoštevanju makro elementov).

Uporaba različnih modelov za različne tipe stavb

Arhitektonski razred stavbe		Modeli			
		CCLM	SEM	DIM	MBM
A	Stavbe, podvržene poškodbam v ravnini zidov (gradovi, palače...)		Globalno		Lokalno
B	Stavbe, podvržene izvenravninskim poškodbam zidov (cerkve, mošeje, mavzoleji...)				
C	Stavbe z elementi, kjer ena dimenzija izstopa (stolpi, zvoniki, minareti...)				
D	Ločne konstrukcije, podvržene poškodbam v ravnini zidov (slavoloki, akvedukti...)				
E	Masivne konstrukcije, v katerih prevladuje lokalna porušitev zidovine (utrdbe, mestni obrambni zidovi...)				
F	Bločne konstrukcije, podvržene prevrnitvi (stebri, obeliski...)				
G	Konstrukcijski sistemi, podvrženi kompleksnim poškodbam (mestna jedra)		Globalno		Lokalno



Standardna



Možna



Redka

3Muri in Sremb spadata v skupino SEM modelov. Iz tabele je sicer razvidno, da je za stavbe, podvržene poškodbam v ravnini zidov, standardna uporaba SEM modelov za globalno oceno odpornosti, MBM pa za lokalno oceno. Za stavbe, za katere so značilne izven ravninske poškodbe, se najbolj pogosto uporablja MBM model.

8.1 RAČUNALNIŠKI PROGRAM SREMB

SREMB («Seismic RESistance of Masonry Buildings») je računalniški program za račun potresne odpornosti enostavnih zidanih zgradb, razvit pri nas na ZRMK Ljubljana (Tomaževič, 1987). Metoda temelji na nelinearni statični (pushover) analizi, kjer namesto sil konstrukciji korakoma vsiljujemo pomike, s čimer lahko opazujemo obnašanje elementa v nelinearnem območju tudi po tem, ko mu odpornost že pada. Potresno odpornost zgradbe ocenimo z etažno histerezo ovojnice, tj. s krivuljo, ki prikazuje razmerje med vsiljenimi vodoravnimi pomiki etaže in odpornostjo.

8.1.1 Predpostavke računa

Program Sremb temelji na poenostavljeni analogiji okvira, kjer zaradi močnih in togih vodoravnih elementov in šibkih slopov prevladuje strižno obnašanje slopov. Porušitev je povezana z nastankom poševnih razpok, parapetov tako v modelu v Srembu ne upoštevamo. Predpostavlja tudi etažni strižni mehanizem, zato je modelirana samo kritična etaža. Slopi se obravnavajo kot polno vpeti na spodnjem in zgornjem robu v parapetni pas zidovja. Potresna odpornost zgradbe je določena v odvisnosti od nosilnosti kritične etaže in njene duktilnosti.

Osnovne predpostavke računa s Srembom so:

- stropne konstrukcije opišemo z obnašanjem togih vodoravnih diafragem, tako da se obtežba, tj. vsiljeni pomiki, porazdelijo po zidovih v razmerju togosti;
- zidovi so vpeti na zgornjem in spodnjem robu v stropno konstrukcijo ali pa v prekladni in parapeti delu zidu;
- prispevek posameznega zidu k potresni odpornosti etaže je odvisen od njegove togosti in nosilnosti ter od deformacij zidu, ki je odvisna od položaja zidu v etaži.

Pri tem velja predpostavka, da četudi se zid zaradi vodoravne obtežbe poruši in ne nudi odpornosti, je še vedno sposoben prevzeti obremenitev zaradi težnostnih sil;

- k potresni odpornosti in togosti konstrukcije je upoštevan tudi prispevek zidov pravokotno na smer potresa

8.1.2 Konstruiranje etažne histerezne ovojnice

Etažna histerezna ovojnica ali krivulja odpornosti je določena na podlagi idealiziranih histereznih ovojnic zidov v obravnavani etaži. Le te so določene na podlagi togosti zidu, nosilnosti in predpostavljenega faktorja duktilnosti.

8.1.2.1 Idealizirana histerezna ovojnica zidu

Togost zidu vpliva na razporeditev potresne obtežbe na posamezne elemente in je ob predpostavki obojestransko vpetih zidov določena z enačbo (8.1).

$$K = \frac{GA}{1,2h \left(1 + 0,83 \frac{G}{E} \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right)}. \quad (8.1)$$

kjer so:

- G strižni modul zidu,
- E elastični modul zidu
- A prerez zidu,
- H višina zidu,
- D dolžina zidu.

Nosilnost zidu program določi v odvisnosti od vzpostavljenega mehanizma porušitve, in sicer kot minimalno izmed dobljenih vrednosti.

Ob poznani togosti, nosilnosti in predpostavljeni duktilnosti sta določena naslednja pomika:

- pomik na meji elastičnosti z enačbo (8.2):

$$d_e = \min(H_{s,w}, H_{f,w})/K, \quad (8.2)$$

- pomik na meji porušitve ob znanem faktorju duktilnosti z enačbo (8.3):

$$d_u = d_e \mu. \quad (8.3)$$

V neelastičnem območju se togost zidu zmanjšuje v odvisnosti od deformacij po enačbi (8.4):

$$K = \min(H_{fs}, H_{ff})/d, \quad (8.4)$$

kjer so:

d trenutni pomik

H_{fs} strižno nosilnost (nastanek poševnih razpok)

H_{ff} strižno nosilnost zaradi upogiba

8.1.2.2 Etažna histerezna ovojnica

Etažno histerezno ovojnico program izračuna tako, da korakoma premika masno težišče etaže, kjer med potresom deluje rezultanta vztrajnostnih sil. Odpornost etaže je pri tem določena z vsoto odpornosti posameznih zidov po enačbi (8.5):

$$H_{tot} = \sum_i^n H_i, \quad (8.5)$$

Odpornost posameznega zidu je na podlagi idealizirane bilinearne odvisnosti določena z:

$$H_i = d_i K_i, \text{ če je } d_i \leq d_{e,i} \quad (8.6)$$

$$H_i = V_{f,i}, \text{ če je } d_{e,i} \leq d_i \leq d_{u,i} \quad (8.7)$$

$$H_i = 0, \text{ če je } d_i \geq d_{u,i} \quad (8.8)$$

Če kakršenkoli izmed zidov v etaži preseže mejo elastičnosti, se spremeni konstrukcijski sistem etaže in s tem togostna matrika. Zato se togost in odpornost posameznih zidov v vsakem koraku računa določita z upoštevanjem vsiljenega pomika in idealizirane histerezne ovojnice zidu. Ko določen zid preseže mejno vrednost pomika d_u , le-ta ne nudi več potresne odpornosti in nima togosti. Zid se izloči iz konstrukcijskega sistema, preostala odpornost zidu pa se porazdeli na ostale zidove, ki še nudijo odpor.

Pri računu so upoštevani torzijski vplivi zaradi ekscentričnosti masnega težišča in težišča togosti. Torzijski zasuki so upoštevani v korekciji pomikov.

8.1.2.3 Idealizirana etažna histerezna ovojnica

Ker nosilnost celotne zgradbe določamo v odvisnosti od nosilnosti in duktilnosti kritične etaže in ker je potresna odpornost zgradbe praviloma manjša od odpornosti kritične etaže, je potrebno etažno krivuljo odpornosti idealizirati, četudi je bila določena s superpozicijo idealiziranih krivulj odpornosti zidov. Idealizirana etažna histerezna ovojnica je določena na naslednji način:

- Začetna, efektivna togost etaže oziroma idealizirane ovojnice K_e je določena z razmerjem med etažno silo in pomikom na meji elastičnosti izračunane histerezne ovojnice oziroma s točko, ko se bistveno spremeni naklon izračunane ovojnice zidu zaradi pojava razpok:

$$K_e = H_e / d_e, \quad (8.9)$$

- Računska nosilnost je določena iz energetskega pogoja, ki pravi da mora biti površina pod idealizirano ovojnico enaka površini pod izračunano ovojnico, z enačbo (8.10):

$$H_u = K_e \left(d_u - \sqrt{d_u^2 - \frac{2A_{env}}{K_e}} \right), \quad (8.10)$$

kjer je:

A_{env} površina pod izračunano krivuljo odpornosti,

d_u idealizirani mejni pomik etaže.

Pri tem velja zveza med idealizirano in izračunano največjo vrednostjo po enačbi (8.11):

$$H_u = 0,9 H_{max}, \quad (8.11)$$

- v skladu z Evrokodom 8-1 je idealizirani mejni pomik d_u določen s točko, ki ustreza 80% največje vrednosti nosilnosti ($0,8 H_{max}$);
- faktor duktilnosti je določen po enačbi (8.12):

$$\mu_{du} = d_u / d_e. \quad (8.12)$$

8.1.3 Preverjanje potresne odpornosti

Z opisano računsko metodo lahko preverimo zahteve glede odpornosti in duktilnosti konstrukcije, kjer je slednja povezana s sposobnostjo disipiranja potresne energije in deformiranja v nelinearnem območju.

Za kontrolo potresne odpornosti konstrukcije se odpornost, izraženo s koeficientom potresne odpornosti SRC_u (»ultimate seismic resistance coefficient«), primerja z mejnim strižnim koeficientom BSC_u (»design base shear coefficient«).

BSC_u je po EC8 izračunan kot razmerje med potresno silo in težo stavbe z enačbo (8.13):

$$BSC_u = \frac{F_b}{W} = \gamma_1 \cdot \frac{a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0}{q} \quad (8.13)$$

SRC_u pa je določen kot razmerje med potresno odpornostjo kritične etaže in težo stavbe z enačbo (8.14):

$$SRC_u = \frac{H_{id}}{W} \quad (8.14)$$

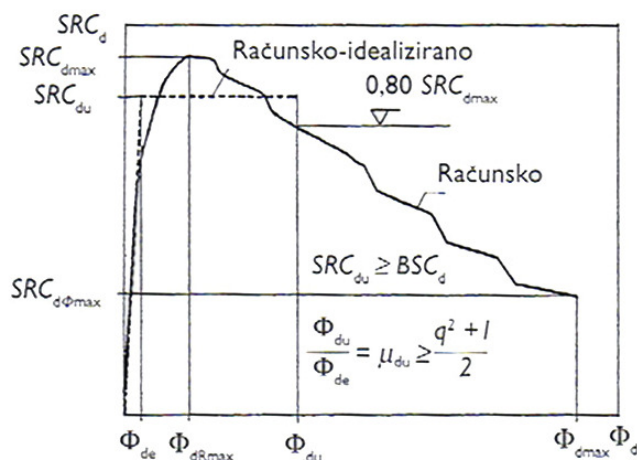
Pri preverjanju potresne odpornosti konstrukcije, se preverja odpornost kritične etaže, stanj posameznih zidov pa ni potrebno preverjati, saj so le-ti že upoštevani v izračunu odpornosti etaže. Veljati mora enačba (8.15):

$$SRC_u \geq BSC_u . \quad (8.15)$$

Kontrola globalne duktilnosti konstrukcije zahteva, da je duktilnost idealizirane ovojnice večja od tiste, ki je bila upoštevana pri računu potresne obtežbe prek faktorja obnašanja q po enačbi (8.16).

$$\frac{d_u}{d_e} = \mu_{du} \geq \frac{q^2 + 1}{2} . \quad (8.16)$$

Konstrukcija ustreza zahtevam glede potresne odpornosti, če sta izpolnjena oba pogoja.



Slika 41: Preverjanje potresne odpornosti na podlagi izračunane krivulje odpornosti zidane stavbe (Tomažević, 2009).

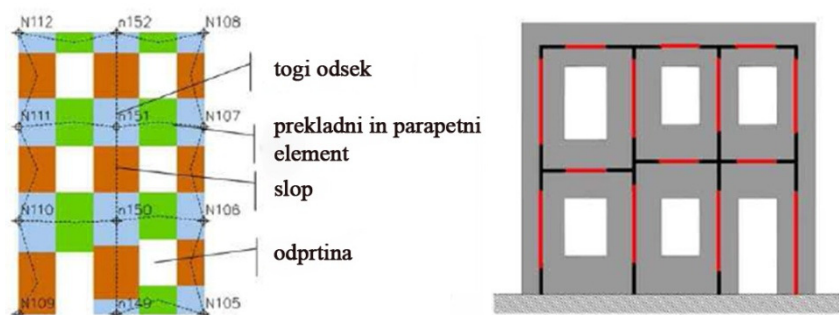
8.2 RAČUNALNIŠKI PROGRAM 3MURI

3Muri je relativno novo programsko orodje, namenjeno za izračun analize obstoječih ali novih zidanih stavb. Poleg linearne statične in modalne analize omogoča določitev odpornosti konstrukcije pri potresni obtežbi v skladu z N2 metodo. Določanje odpornosti konstrukcije pri potresni obtežbi temelji na nelinearni statični analizi, pri čemer kot rezultat dobimo histerezno ovojnico oziroma krivuljo kapacitete.

8.2.1 FME metoda

Stene zidanih stavb so modelirane z ekvivalentnim okvirjem. Ekvivalentni okvir določajo nelinearni makroelementi; slopi (angl. *piers*), prekladni in parapetni vodoravni elementi (angl. *spandrel beams*) ter togi odseki (angl. *rigid elements*), ki ostale elemente med seboj povezujejo. Obnašanje slopov, prekladnih in parapetnih elementov modeliramo z linijskimi elementi z dvema vozliščema. Povezave le-teh s togimi odseki, ki omogočajo prenos statičnih in kinematičnih količin med vozlišči elementov, formirajo ekvivalentni okvir

Spodnja slika prikazuje razdelitev stene na mrežo makro-elementov ter njej ekvivalenten okvir, kjer rdeče linije označujejo sople ter parapetne in prekladne elemente, črne linije pa toge odseke.



Slika 42: Stena, modelirana z mrežo makroelementov in ekvivalentni okvir (S.T.A DATA)

Takšno modeliranje zidane stene z okvirjem dovolj natančno opiše njeno obnašanje ter omogoča redukcijo prostostnih stopenj. Ker je reducirano število prostostnih stopenj, je skrajšan čas računanja v primerjavi z metodo končnih elementov.

8.2.2 Nelinearna statična analiza

Globalno obnašanje konstrukcije na potresno obtežbo v X ali Y smeri je določeno z nelinearno statično analizo prek spremljanja pomika v kontrolni točki. Obnašanje konstrukcije lahko opazujemo v vseh fazah od nanosa potresne obtežbe do porušitve konstrukcije.

Delovanje programa obsega podajanje vhodnih podatkov, računsko analizo ter kontrolo.

8.2.2.1 Podajanje vhodnih podatkov

Pomoč pri definiranju konstrukcijskih elementov je obsežna paleta različnih izvedb sten, stropov, ki služijo za razporejanje horizontalne obtežbe in določanje togosti, ter linijskih elementov (stebri in nosilci). Elementu je potrebno definirati ustrezne materialne lastnosti in geometrijske karakteristike ter odprtine, če jih element vsebuje. Materialne lastnosti, ki jih podamo so: elastični modul E , strižni modul G , specifično teža w , tlačno trdnost f_m in natezno trdnost $f_t = 1,5 \tau$.

8.2.2.2 Računska analiza

Predpogoj za začetek nelinearne statične analize je generiranje ekvivalentnega okvira, ki ga program sam ustvari na osnovi geometrije vstavljenih elementov. Po tem koraku se ustvari mreža makroelementov, kjer je mogoča tudi naknadna modifikacija le-teh. Naslednja faza računske analize je nelinearna statična analiza, pri kateri so vodeni pomiki, monotono naraščajoča obtežba pa se na konstrukcijo razporedi ob upoštevanju masne ali modalne razporeditve.

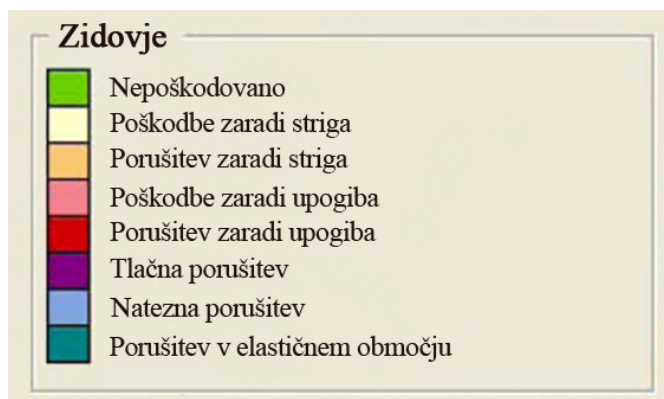
Obtežba je podana v skladu s SIST EN 1998-1 in zahteva podatek o vrednosti pospeška temeljnih tal, tipu tal ter vrednosti faktorja pomembnosti. Program maso in potresne sile razporedi po vseh vozliščih etaž.

Poleg nelinearne statične analize program opravi še modalno analizo ter linearno statično analizo za kontrolo vertikalne obtežbe, ekscentričnosti masnega težišča in kontrolo vitkosti.

Rezultat nelinearne statične analize je pushover krivulja, kjer je prikazana odvisnost prečne sile ob vpetju od pomika kontrolne točke.

Na podlagi pushover krivulje je z določili N2 metode (Fajfar, 2002) dobljena kapaciteta, s katero je izražena potresna odpornost konstrukcije. Na podlagi krivulje kapacitete program poda še bilinearni diagram ob upoštevanju N2 metode.

Program omogoča opazovanje mehanizma porušitve in stopnjo poškodovanosti za vsak element v vsakem koraku analize. Posamezno stanje je za posamezen zidu določeno z barvno legendo za zidovje (slika 43)



Slika 43: Barvna legenda poškodovanosti za zidovje (S.T.A. DATA, 2009)

8.2.2.3 Kontrola rezultatov

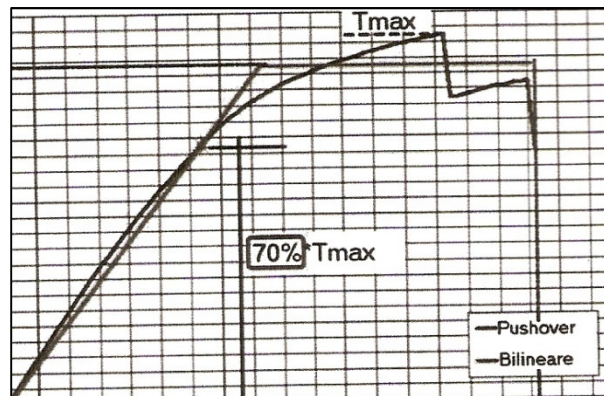
Izračunani pomik konstrukcije primerja s pomikom, ki ga predpisuje standard za mejno stanje nosilnosti, ki ustreza mejnemu stanju SD (angl. *Significant Damage*), in mejno stanje uporabnosti, ki ustreza mejnemu stanju DL (angl. *Damage Limit*). Mejne vrednosti za kontrolo MSN (Mejno Stanje Nosilnosti) so določene z minimalnim pomikom, ki je dobljen:

- s točko, ki ustreza 80 % vrednosti maksimalne nosilnosti (v skladu z Evrokodom 8-3 (Dodatek C) ter
- z mejno vrednostjo redukcijskega faktorja q^* , ki za nearmirane zidane stavbe znaša 1,5.

Mejne vrednosti za kontrolo MSU (Mejno Stanje Uporabnosti) so določene z mejno vrednostjo pomika etaže.

8.2.3 Rezultati

Program definira presečišče »pushover« krivulje in bilinearnega diagrama pri 70 % vrednosti maksimalne strižne sil. T_{max} , kar je del N2 metode in je prikazano na sliki 44.



Slika 44: Določitev bilinearne ovojnice v N2 metodi (S.T.A. DATA, 2009)

Rezultati, ki jih dobimo s programom so naslednji:

- “pushover” krivulja
- pomiki, notranje sile ter reakcije za različne stene za vsak korak “pushover” analize,
- napetosti v temeljnih tleh za vsak korak analize
- poškodovanost in mehanizem porušitve za vsak element v vsakem koraku analize, kar je zelo pregledno prikazano z barvami in animacijo v različnih pogledih, tako da se hitro vidi šibke točke konstrukcije, ki se jih lahko po potrebi uredi
- program primerja pomik, ki je izračunan iz konstrukcije, s pomikom, ki ga predpisuje standard
- modalna analiza
- kontrola ekscentričnosti zidanih elementov in statična kontrola njihove osne nosilnosti
- program prikaže tudi nekatere od vmesnih rezultatov
 - T^* - nihajni čas ekvivalentnega SDOF sistema
 - m^* - efektivna masa ekvivalentnega SDOF sistema
 - w – masa MDOF sistema
 - duktilnost μ
 - pospešek tal, ki povzroči MSN
 - pospešek tal, ki povzroči MSU
 - kontrola MSN
 - kontrola MSU.

8.2.3.1 Prikaz rezultatov na primeru

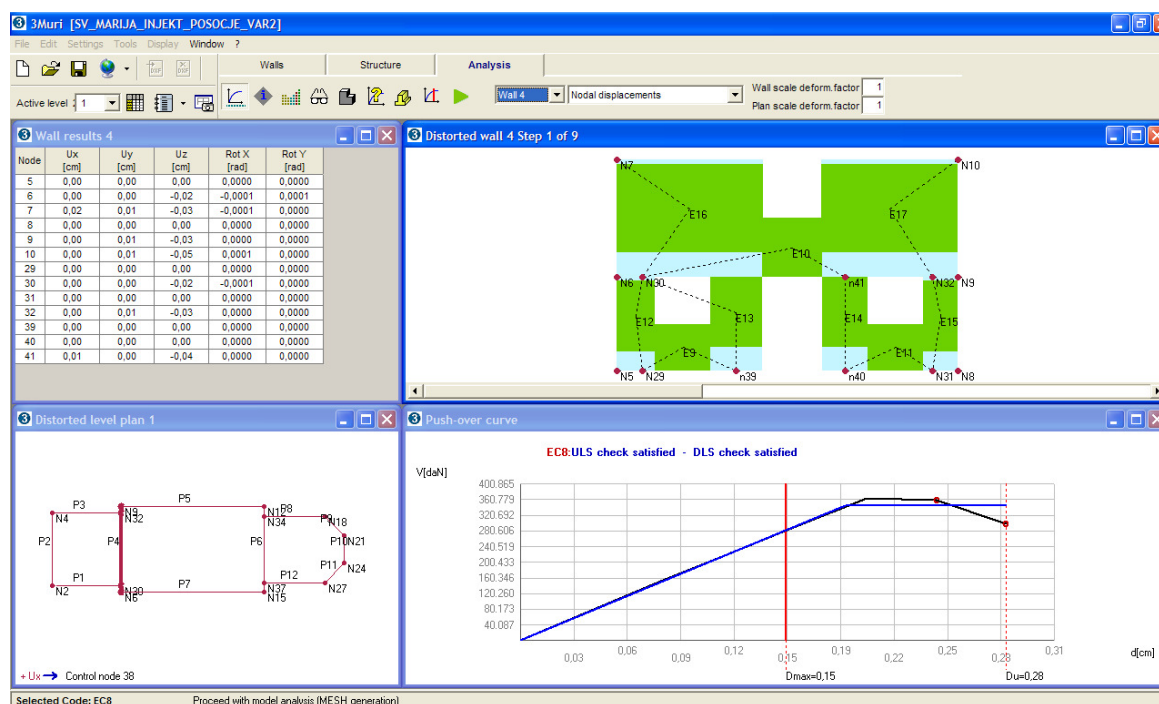
Po izvedeni nelinearni statični analizi program pregledno prikaže najpomembnejše rezultate v obliki tabele (slika 45).

No.	Insert in report	Earthquake	Uniform pattern of lateral load	Ecc. [cm]	Dmax ULS [cm]	Du ULS [cm]	q* ULS	Dmax DLS [cm]	Dd DLS [cm]	Alpha u	Alpha e
1	<input checked="" type="checkbox"/>	+	Masses	0.0	0.13	0.23	0.666	0.06	0.24	1.671	2.659
2	<input type="checkbox"/>	+X	First mode	0.0	0.15	0.28	0.917	0.09	0.20	1.379	2.075
3	<input type="checkbox"/>	-X	Masses	0.0	0.13	0.16	0.906	0.06	0.16	1.126	1.677
4	<input type="checkbox"/>	-X	First mode	0.0	0.30	0.12	1.457	0.09	0.12	0.708	1.177
5	<input type="checkbox"/>	+Y	Masses	0.0	1.93	3.55	3.090	1.06	0.72	1.000	0.736
6	<input type="checkbox"/>	+Y	First mode	0.0	2.13	3.43	3.594	1.21	0.68	0.835	0.621
7	<input type="checkbox"/>	-Y	Masses	0.0	1.96	3.41	3.358	1.08	0.68	0.893	0.686
8	<input type="checkbox"/>	-Y	First mode	0.0	2.25	2.65	4.146	1.29	0.68	0.724	0.579

Colour legend
■ Satisfied ■ Not satisfied ■ Self weight not converging

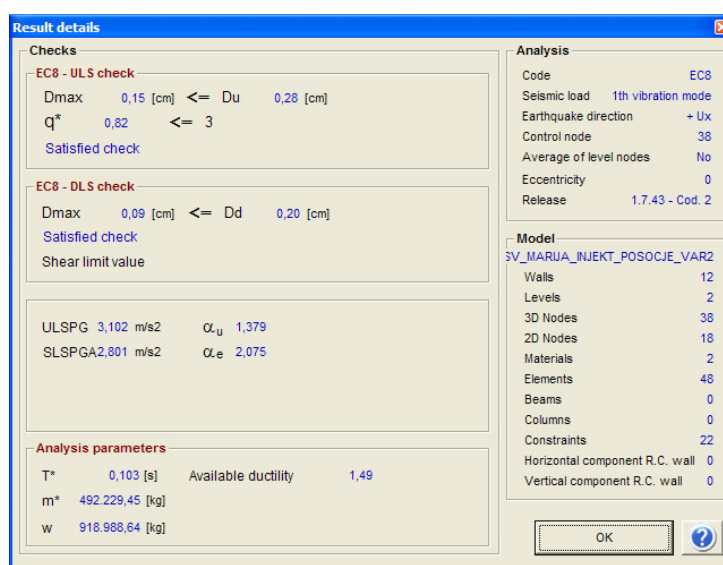
Slika 45: Tabela rezultatov v 3Muriju

Vsako od analiz lahko podrobno pregledamo. Odpre se več oken, v katerih lahko vidimo »pushover« krivuljo za obravnavano analizo in kontrolno točko (slika 46 - desno spodaj), pomike etaže v tlorisnem pogledu (slika 46 - spodaj levo), poškodovanost elementov/stene (slika 46 - zgoraj desno) in tabelarni prikaz rezultatov (pomiki, reakcije, notranje sile) (slika 46 - zgoraj levo).



Slika 46: Okno s podrobnimi rezultati analize

Program prikaže tudi podrobne rezultate, ki se nanašajo na posamezno »pushover« analizo (slika 47).



Slika 47: Podrobni rezultati »pushover« analize

Oznake na sliki 47 so:

$D_{\max, \text{MSN}} = D_t$	ciljni pomik oziroma zahteva potresa, ki izhaja iz elastičnega spektra
D_u	kapaciteta konstrukcije v smislu pomika (pomik blizu porušitve)
q	faktor obnašanja, ki je za nearmirane zidane konstrukcije omejeno s 3
$D_{\max, \text{MSU}}$	zahteve potresa v smislu MSU
D_d	kapaciteta konstrukcije v smislu pomika pri MSU
ULSPGA	pospešek tal, ki povzroči MSN oziroma porušitev konstrukcije
SLSPGA	pospešek tal, ki povzroči MSU oziroma poškodbe konstrukcije
T^*	nihalni čas ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo
m^*	masa ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo
w	celotna masa sistema z več prostostnimi stopnjami

9 ANALIZA POTRESNE ODPORNOSTI CERKEV SVETEGA URHA V BOVCU

9.1 Opis

Cerkev svetega Urha v Bovcu je evidentirana v registru kulturne dediščine pod evidenčno številko enote 3566. Datacija objekta je pozni srednji vek, druga četrtina 18. stol. oziroma leto 1734 in tretja četrtina 19. stol. oziroma leto 1869. Obdobje izgradnje je srednji vek (1000 – 1500).



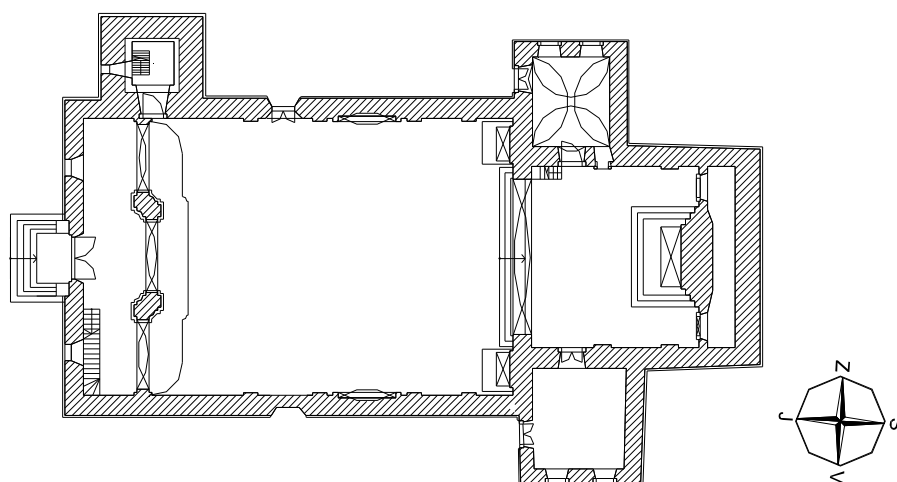
Slika 48: Fotografija cerkve sv. Urha v Bovcu

Cerkev s svojo lego na visokem platoju, do katerega vodi monumentalno stopnišče, daje Bovcu slikovitejši izgled. Glavna fasada je oblikovana v neoromanskem stilu, v ladji cerkve pa najdemo ostanke stare gotske zidave, katere sledovi so vidni v gotških portalih ter v gotškem slavlolu v vzhodni steni ladje. V notranjosti prezbiterja je mogočen oltar, izdelan iz domačega rdečkastega kamna. Okna so izdelana iz raznobarvnega stekla (vitraž). Zunanjo podobo cerkve dopolnjuje mogočen zvonik.

Župnijska cerkev sv. Urha v Bovcu je sakralni objekt, ki je bil skozi čas večkrat prezidan, zadnjič v večjem obsegu po prvi svetovni vojni. Iz tega razloga smo se odločili, da zakristij, ki se nahajata levo in desno od prezbiterja, ne upoštevamo v modelu.

9.2 Zasnova konstrukcije

Cerkev ima glavno ladjo, prezbiterij pravokotne oblike, stranski zakristiji in zvonik. Tlorisne dimenzije ladje so 22,4 x 15,5 m, prezbiterija 11,7 x 10,6 m, zakristij 5,9 x 5,6 in 5,5 x 5,3 m ter zvonika 5,0 x 5,0 m. Višina čelne stene ladje do slemena je 17,0 m, višina stranske stene ladje do kapi pa 11,0 m nad terenom. Višina zvonika do ožjega odprtega dela, kjer so zvonovi, je 19,5 m. Bolj natančna celotna geometrija objekta z načrti tlorisa in prečnih prerezov je podana v nadaljevanju.



Slika 49: Tloris pritličja, Cerkev sv. Urha v Bovcu

Stavba ima pasovne kamnite temeljne zidove. Nosilni zidovi so zidani iz kamnitega gradiva in potekajo samo po obodih posameznih funkcionalnih prostorov. Nad ladjo in prezbiterijem je lesen strop, v zvoniku pa so armiranobetonske plošče. Armiranobetonska je tudi plošča kora. Strešna konstrukcija je lesena, krita s pločevinasto kritino.

Debeline kamnitih nosilnih zidov cerkve v spodnjem delu so od 0,9 do 1,2 m, pri zakristiji na severni strani pa tudi samo 0,7 m. Zidovi zvonika so v pritličju debeli od 1,4 do 1,6 m. Vsi zidovi se z višino tanjšajo, čisto ob terenu pa so tudi debelejši od navedenega.

Stropno konstrukcijo objekta tvorijo leseni stropniki, ki so široki od 0,13 do 0,16 m in visoki od 0,15 do 0,17 m. Ležijo v vzdolžni smeri na medsebojnih osnih razdaljah 0,94 m. Opore stropnikov na koncih so letve dimenzij od 0,04 do 0,08 m, ki so s strani pribite na prečne

natezne poveznike ostrešja dimenzij od 0,20 do 0,22 ali od 0,26 do 0,28 m. Le-ti so na medsebojnih osnih razdaljah 3,56 m. Povezniki so na mestih soh podaljšani z zareznim preklopom, stiki pa so povezani z vijaki. Na stropnike so s spodnje strani pribite deske debeline 0,022 m, spodaj pa je apneni omet na trstiki. Trstika je kvalitetna tradicionalna armatura, narejena iz ročno prebranih stebel trstike in vezana s cinkano žico.

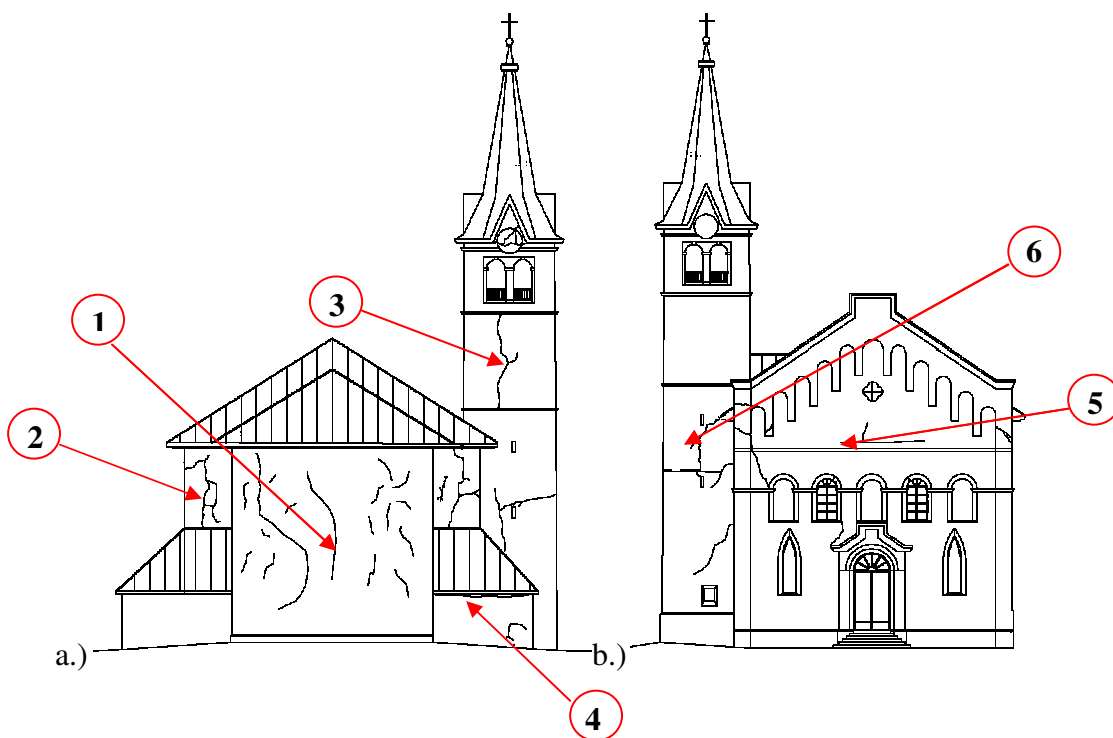
Etažna konstrukcija kora ni vidna zaradi zaključnih slojev, vendar po dinamičnem odzivu in ker ni opaznih deformacij, sklepamo, da gre za armirano betonsko ploščo. Armiranobetonske plošče zvonika so debele 0,15 m.

Nad ladjo in prezbiterijem je ostrešje tri oziroma štirikapno, z žlotami na zoženju za prezbiterij z nekoliko nižjim slemenom. Nad zvonikom je izvedena špica s frčadami, nad stranskima zakristijama pa sta trikapnici.

Nosilni prerezi posameznih lesenih elementov so zmanjšani zaradi delovanja lesnih škodljivcev.

9.3 Analiza poškodb

V nadaljevanju je opisano stanje objekta, ki se sklicuje na kataster razpok, ki je bil narejen za vse štiri fasade. Podatki, ki so podani v spodnji analizi za posamezno oznako poškodbe so vrsta razpok, dolžina razpok in mehanizem poškodb z verjetnim vzrokom za nastanek.



Slika 50: a.) Kataster poškodb - severna fasada in b.) kataster južna fasada,
Cerkev sv. Urha v Bovcu

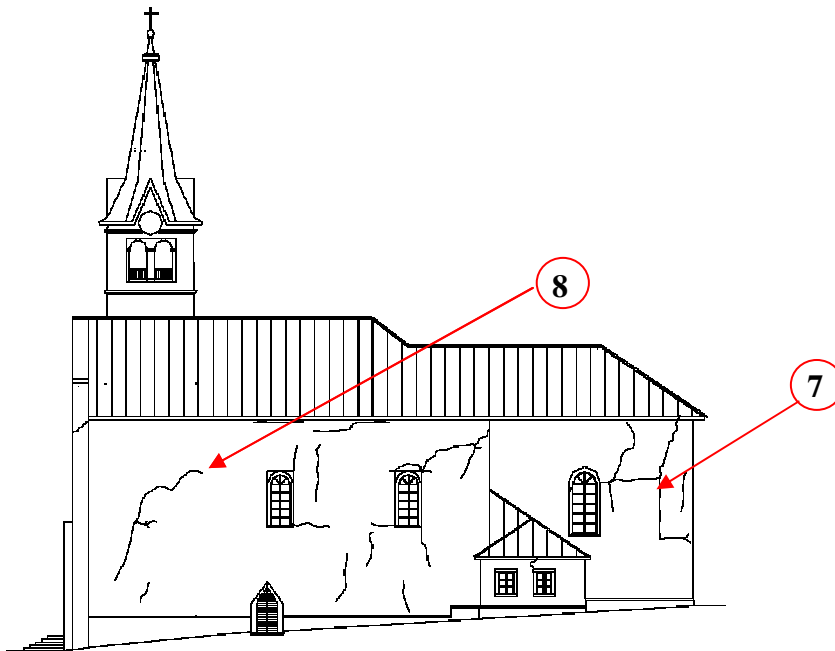
Severna fasada

1. Prezbiterij: vertikalne razpoke različnih dolžin. Dolžine razpok od 0,55 do 10,0 m. Mehanizem poškodb: Strižne razpoke prezbiterija oziroma apside (4.17). Pomanjkanje zidnih vezi, prerazporeditev strešne obtežbe .
2. Ladja: vertikalne in diagonalne razpoke na zgornjem delu. Dolžine razpoke od 0,4 do 3,6 m. Mehanizem poškodb: Sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije (4.25). Velike razlike v globalni togosti posameznih sklopov.
3. Zvonik: vertikalne in horizontalne razpoke. Dolžina razpok od 0,25 do 5,5 m. Mehanizem poškodb: Stolp zvonika (4.27). Zidovina slabe kakovosti in odsotnost povezanosti zidov.

4. Župnišče: horizontalna razpoka. Dolžina razpoke 5,0 m. Mehanizem poškodb: Streha – glavna ladja (4.19). Povečana teža in togost strehe.

Južna fasada

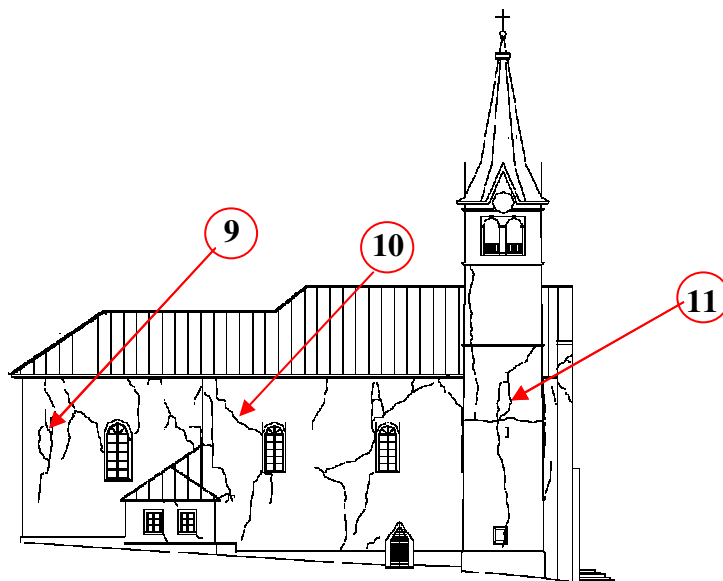
5. Ladja: horizontalna razpoka. Dolžina razpoke 4,6 m. Mehanizem poškodb: Prevrnitev zatrepnega dela fasade (4.2). Slaba povezanost s streho.
6. Zvonik: vertikalne razpoke in horizontalna razpoka, ki je skoraj presekala zid. Dolžine razpok od 0,5 do 3,8 m. Mehanizem poškodb: Stolp zvonika (4.27). Zidovina slabe kakovosti in odsotnost povezanosti zidov.



Slika 51: Kataster poškodb - vzhodna fasada, Cerkev sv. Urha v Bovecu

Vzhodna fasada

1. Prezbitერიj: vertikalne in horizontalne razpoke. Dolžina razpok 0,5 do 9,0 m. Skorajšnja prevrnitev fasade zaradi separacija fasade od stranskih zidov v bližini vogala. Mehanizem poškodb: Strižne razpoke prezbiterja oziroma apside (4.17). Prisotnost velikih odprtín, zidovi relativno tanko podprti na veliki razdalji.
2. Ladja: vertikalne razpoke. Dolžina razpoke 1,8 in 8,8 m. Mehanizem poškodb: Strižne razpoke v vzdolžnih zidovih (4.6). Zidovi slabe kakovosti ali pretenki zidovi.



Slika 52: Kataster poškodb - zahodna fasada, Cerkev sv. Urha v Bovcu

Zahodna fasada

3. Prezbitერიj: vertikalne in diagonalne razpoke. Dolžina razpok 1,2 do 5,8 m. Mehanizem poškodb: Strižne razpoke prezbitერიja oziroma apside (4.17). Prisotnost velikih odprtín, zidovi relativno tanko podprti na veliki razdalji.
4. Ladja: vertikalne razpoke. Dolžina razpoke 1,3 in 7,7 m. Mehanizem poškodb: Strižne razpoke v vzdolžnih zidovih (4.6). Poslabšanje nosilnosti zaradi prisotnosti odprtín v zidovih.
5. Zvonik: vertikalne razpoke in horizontalna razpoka, ki je skoraj presekala zid. Dolžine razpok od 2,7 do 10,8 m. Mehanizem poškodb: Stolp zvonika (4.27). Zidovina slabe kakovosti in odsotnost povezanosti zidov.

9.4 Seizmična analiza

Analiza potresne odpornosti sakralnega objekta je razdeljena na dva dela. Na analizo z računalniškim programom 3Muri in s programom Sremb. Pri analizi s programom 3Muri sta bila narejena 2 primera zaradi iskanja primerne modela. S programom Sremb je bil narejen le en primer, namenjen primerjavi rezultatov. Primeri so opisani v nadaljevanju.

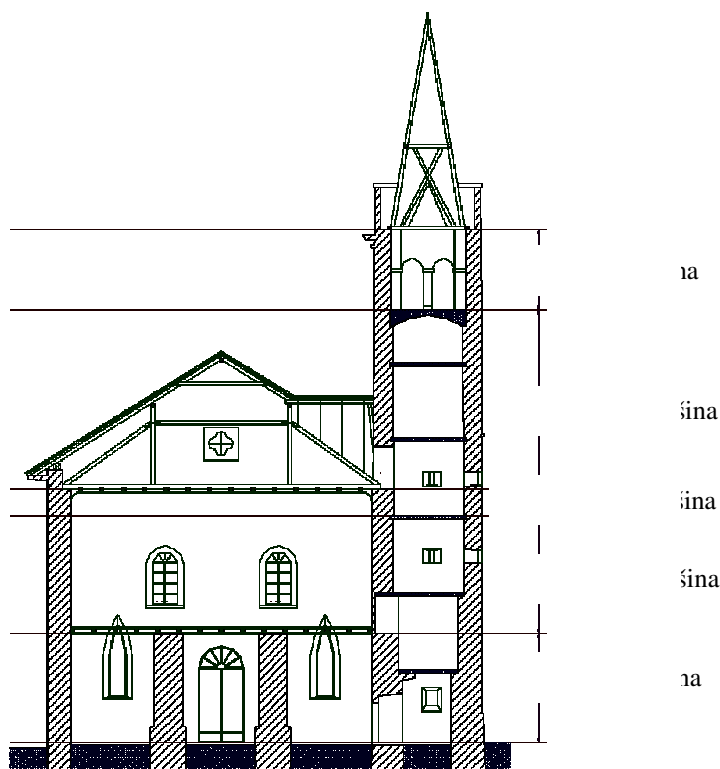
9.4.1 Analiza s programom 3Muri

S programom 3Muri sta bila analizirana dva modela. Pri prvem je modeliran celotni zvonik, pri drugem pa je le-ta skrajšan. Model s celotnim zvonikom je problematičen, ker v določenih primerih analize zgornji del zvonika »odnese«. Pri drugem modelu je višina zvonika enaka višini ladje, lastna teža zvonika pa je prenesena na preostali del zvonika kot linijska obtežba. Za vsak model je bilo narejenih šest nelinearnih statičnih analiz za obe smeri vzbujanja. Analize so se med seboj razlikovale glede na materialne karakteristike, ki so opisane v poglavju Obtežbe in material (6)

9.4.1.1 Modeliranje konstrukcije

9.4.1.1.1 Etažne višine

Pri modeliranju prvega modela objekta je bilo uporabljenih pet etažnih višin, medtem ko so za drugi model bile uporabljene tri etažne višine. Vse etažne višine so med seboj različne. Bolj podroben potek etažnih višin je razviden iz slike 54.



Slika 53: Etažne višine objekta, Cerkev sv. Urha v Bovcu

- Prva etažna višina se zaključi pod korom, saj je le tako mogoče upoštevati kor v modelu.
- Druga etažna višina se zaključi 1,50 m nad zgornjimi okni oziroma pri tretjem armirano betonskem podestu v zvoniku. Vzrok za definicijo te etažne višine so razpoke, ki so nastale med potresom leta 2004.
- Tretja etažna višina se zaključi na višini stropne konstrukcije nad ladjo in prezbiterijem.
- Četrta etažna višina se zaključi nad zadnjim armirano betonskim podestom v zvoniku zaradi precej velike debeline plošče. Vzrok za takšno debelino plošče je velika teža zvonov v zvoniku.
- Peta etažna višina se zaključi na mestu, kjer ostrešje zvonika nalega na stene zvonika.

Ta razporeditev etažnih višin se smatra za najbolj optimalno rešitev, saj je določena glede na porušitve, ki so nastale na objektu ob potresu leta 2004 v Posočju. Etažne višine bi sicer lahko predpostavili tudi drugače.

9.4.1.1.2 Stropne plošče

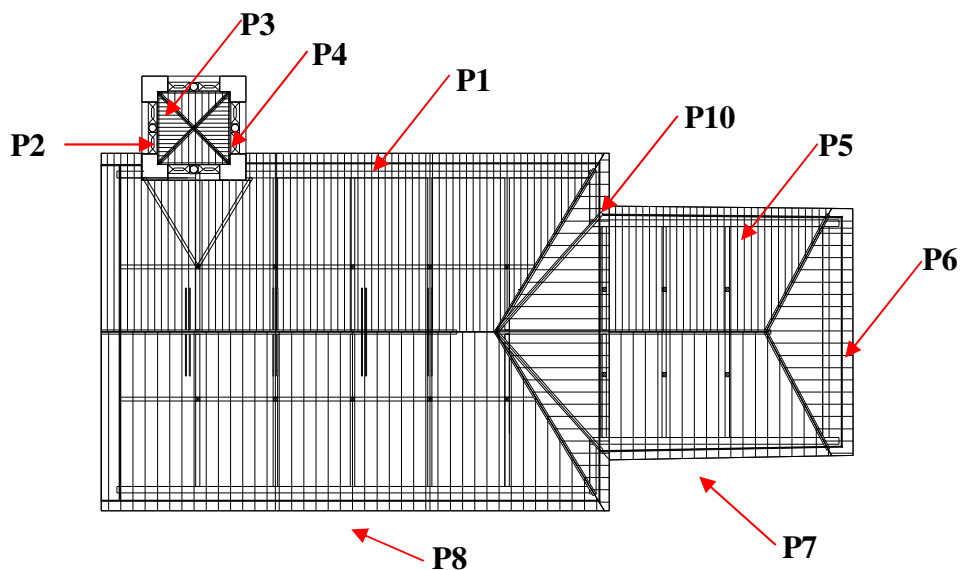
Stropne plošče so bile podane kot plošče, nosilne v krajši smeri. Definiranje dimenzij in vrste stropa program uporabi le za izračun nadomestne togosti stropne konstrukcije, ne vpliva pa na velikost obtežbe stropa. Takšna razporeditev obtežbe velja za oba modela. V preglednici 6 je podana lastna površinska obtežba stropnih plošč.

Preglednica 6: Lastna površinska obtežba stropnih plošč, Cerkev sv. Urha v Bovcu

Stropna plošča	g (daN/m ²)
nad ladjo	57
nad prezbiterijem	57
v zvoniku (spodnje etaže)	228
v zvoniku (pod zvonom)	380

9.4.1.1.3 Strešna konstrukcija

Velik del obtežbe strešne konstrukcije se prenaša na vzdolžne zidove. Na sliki 54 je prikazano, kako se lastna teža posamezne strešne konstrukcije prenese na zidove kot linijska obtežba. Takšna razporeditev strešne obtežbe velja za oba modela.



Slika 54: Tloris ostrešja, Cerkev sv. Urha v Bovcu

V preglednici 7 so podani zidovi in upoštevana linijska obtežba na posamezne zidove. Poimenovanje zidov je enako, kot ga uporablja 3Muri. Pri zidu P1 sta v preglednici podani dve vrednosti za linijsko obtežbo, prva se nanaša na del zidu nad ladjo, druga v oklepaju pa na zid zvonika.

Preglednica 7: Lastna obtežba strešne konstrukcije, Cerkev sv. Urha v Bovcu

Zid	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P10
Linijska obtežba (daN/m)	377(166)	166	166	166	146	70	146	377	155

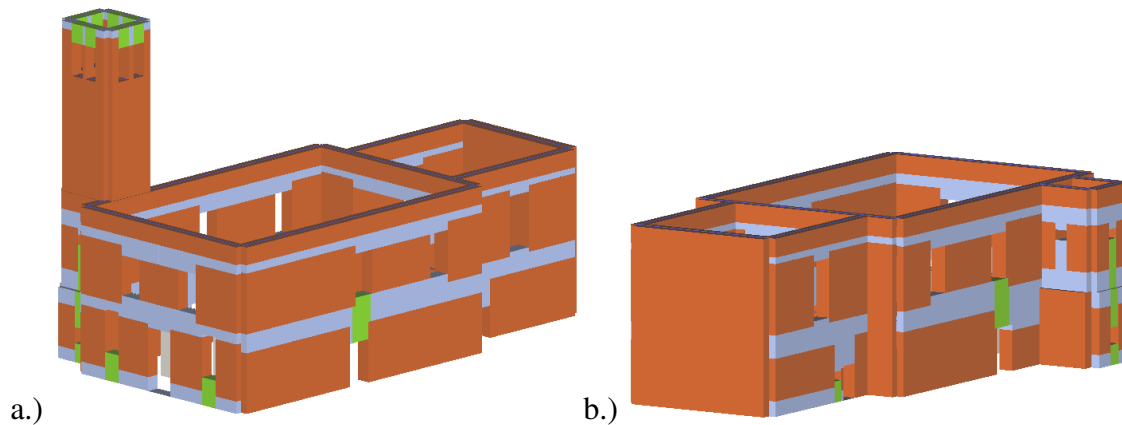
9.4.1.1.4 Zvonik

Obtežba skrajšanega dela zvonika se na model prenese kot linijska obtežba na zidove. V preglednici 8 so podani zidovi in upoštevana linijska obtežba na posamezni zid v zvoniku.

Preglednica 8: Lastna obtežba zvonika, Cerkev sv. Urha v Bovcu

Zid	P1	P2	P3	P4
Linijska obtežba (daN/m)	17488	17685	17488	17685

Na sliki 58 sta prikazana 3D modela, ki prikazujeta slopove (elementi obarvani rjavo), preklade oziroma parapete (elementi obarvani zeleno) in toge odseke (elementi obarvani sivo).



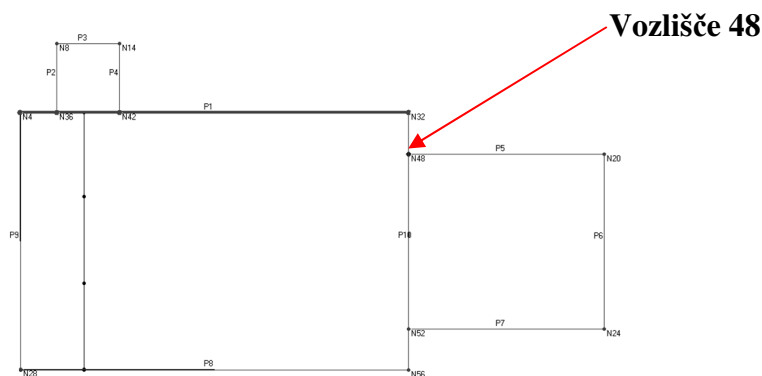
Slika 55: a.) 3D model z zvonikom in b.) 3D model z porezanim zvonikom,
Cerkev sv. Urha v Bovcu

9.4.1.2 Nelinearna statična analiza

Pred samo nelinearno statično analizo 3Muri generira ekvivalentni okvir. Ustvari se mreža dvo-vozliščnih makro-elementov.

Prvi model je sestavljen iz 89 makro-elementov, ki so razporejeni v petih etažah. Ti elementi ležijo v 11 ravninah zidov (označenih na sliki 55) in so sestavljeni iz 64 3D vozlišč oziroma 36 2D vozlišč. Drugi model je sestavljen iz 65 elementov, ki so razporejeni v treh etažah. Ti elementi ležijo v 11 ravninah zidov (označenih na sliki 55) in so sestavljeni iz 56 3D vozlišč oziroma 27 2D vozlišč.

Za kontrolno točko je bilo v obeh modelih izbrano vozlišče 48, ki je najbližje centru mase. Izbira kontrolne točke vpliva na dobljene rezultate. Krivuljo kapacitete 3Muri riše v tej izbrani točki. Lega izbrane kontrolne točke je prikazana v sliki 56.



Slika 56: Zaporedna števila vozlišč in ravnin zidov na tlorisu nadstropja,
Cerkev sv. Urha v Bovcu

9.4.1.3 Rezultati

Poglavje rezultati se deli na dve podpoglavji. V prvem podpoglavju so zbrani in obdelani rezultati, ki so bili pridobljeni iz analiz, narejenih na 3D modelu z zvonikom, v drugem podpoglavju pa so zbrani rezultati, pridobljeni iz analiz na 3D modelu s skrajšanim zvonikom.

Glede na materialne lastnosti zidovine je bilo narejenih šest različnih primerov za vsak 3D model posebej. Za vsak primer je bilo izračunanih osem »pushover« krivulj za potres v +X, -X, +Y in -Y smeri z enakomerno in modalno razporeditvijo mase brez upoštevanja dodatne ekscentričnosti. Rezultati za neinjektirano zidovino so zbrani v prvi preglednici, rezultati za injektirano zidovino pa v drugi preglednici. Podatki v poljih, ki so obarvani v preglednicah, so uporabljeni v grafikonih. Za vsak primer analize so bili za primerjavo izbrani merodajni primeri za X smer in Y smer potresa glede na izračunani minimalni mejni pospešek tal.

Pomen količin v preglednici je opisan v poglavju Računalniški program Sremb in 3Muri (8) v podpoglavju Prikaz rezultatov na primeru (8.2.3.1).

9.4.1.3.1 Model objekta z zvonikom

Rezultati nelinearne statične analize, ki je bila opravljena na prvem modelu, so zbrani v Preglednica 9 in Preglednica 10. Koeficienti potresne odpornosti SRC, ki jih 3Muri ne poda, so izračunani v skladu z enačbo (9.1):

$$SRC = \frac{H_{id}}{w} \quad (9.1)$$

kjer sta:

H_{id} ...nosilnost na idealizirani ovojnici

w ...celotna teža konstrukcije

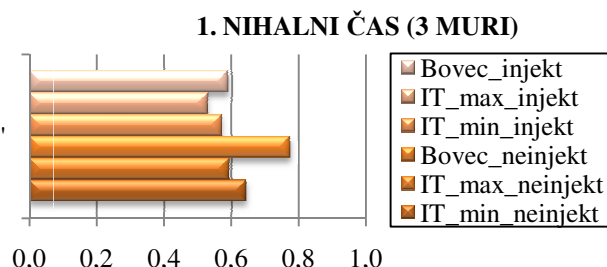
Preglednica 9: Rezultati nelinearne statične analize za neinjektirano stanje zidovine,
Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model objekta z zvonikom)

			Dmax [cm]	Du [cm]	q*	Dmax [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s2]	T* [s]	m*10^3 [t]	w*10^3 [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 -min	X	+X	0,77	7,95	0,77	0,46	3,88	0,77	8,74	0,50	2,59	2,65	8,00	0,99	3,94	0,149
		+X	2,42	16,38	0,32	1,45	6,77	0,32	15,23	1,60	2,59	2,65	2,19	7,47	2,98	0,112
		-X	0,24	7,13	0,75	0,14	3,99	0,75	8,98	0,28	2,59	2,65	22,53	0,31	4,10	0,155
		-X	2,67	22,27	0,27	1,60	8,32	0,28	18,73	1,77	2,59	2,65	2,31	9,64	3,15	0,119
	Y	+Y	1,45	0,75	3,87	0,85	0,53	3,87	1,20	0,42	2,23	2,65	2,25	0,33	1,62	0,061
		+Y	1,69	1,46	3,64	1,00	0,82	3,64	1,85	0,48	2,23	2,65	3,25	0,44	1,71	0,064
		-Y	1,52	1,03	3,83	0,89	0,68	3,83	1,53	0,44	2,23	2,65	2,83	0,36	1,63	0,062
		-Y	1,71	1,73	3,94	1,02	0,76	3,94	1,71	0,48	2,23	2,65	4,09	0,42	1,57	0,059
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 -max	X	+X	1,45	14,29	0,28	0,87	9,86	0,28	22,20	0,94	2,57	2,65	2,76	5,17	5,86	0,221
		+X														
		-X	1,16	5,93	0,40	0,70	5,10	0,40	11,49	0,76	2,57	2,65	2,05	2,89	5,09	0,192
		-X														
	Y	+Y	1,15	1,04	3,09	0,64	0,91	3,10	2,05	0,36	2,25	2,65	3,52	0,29	1,98	0,075
		+Y	1,37	1,55	3,30	0,80	0,90	3,31	2,04	0,41	2,25	2,65	4,25	0,36	1,84	0,070
		-Y	1,16	1,08	3,21	0,66	0,93	3,22	2,09	0,36	2,25	2,65	3,72	0,29	1,90	0,072
		-Y	1,38	1,09	3,59	0,80	0,79	3,60	1,79	0,42	2,25	2,65	3,22	0,33	1,70	0,064
NEINJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	1,43	13,56	0,73	0,86	4,05	0,74	9,12	0,63	2,30	2,65	6,99	1,94	4,35	0,164
		+X	3,89	33,27	0,42	2,33	7,10	0,42	15,98	1,72	2,30	2,65	3,62	9,19	2,81	0,106
		-X	0,72	12,76	0,98	0,43	3,05	0,98	6,88	0,40	2,30	2,65	17,38	0,73	4,18	0,158
		-X	4,51	39,30	0,27	2,70	8,71	0,28	19,61	2,25	2,30	2,65	2,43	16,1	2,89	0,109
	Y	+Y	2,71	1,26	3,75	1,63	0,46	3,76	1,04	0,57	2,08	2,65	1,75	0,72	1,77	0,067
		+Y	3,01	1,84	3,28	1,81	0,61	3,28	1,37	0,64	2,08	2,65	2,00	0,92	1,82	0,069
		-Y	2,73	1,32	3,75	1,64	0,48	3,75	1,08	0,58	2,08	2,65	1,81	0,72	1,76	0,066
		-Y	3,05	1,77	3,43	1,83	0,58	3,44	1,30	0,65	2,08	2,65	2,00	0,88	1,71	0,065

Preglednica 10: Rezultati nelinearne statične analize za injektirano stanje zidovine,
Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model objekta z zvonikom)

			D _{max} [cm]	D _u [cm]	q*	D _{max} [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s ²]	T* [s]	m*10 ³ [t]	w*10 ³ [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
INJEKTIRANO OPCM 2003 min	X	+X	1,28	6,74	0,25	0,77	5,26	0,25	11,84	0,84	2,57	2,65	1,33	5,068	7,24	0,273
		+X														
		-X	0,99	5,98	5,98	0,60	6,01	0,44	13,54	0,65	2,57	2,65	2,64	2,265	5,38	0,203
		-X	2,03	6,03	6,03	1,22	2,96	0,34	6,67	1,25	2,57	2,65	1,00	6,030	3,90	0,147
	Y	+Y	1,01	1,07	1,07	0,55	1,04	2,80	2,35	0,33	2,26	2,65	3,86	0,277	2,18	0,082
		+Y	1,21	1,28	1,28	0,69	0,96	3,11	2,17	0,38	2,26	2,65	3,91	0,327	1,95	0,074
		-Y	1,03	0,99	0,99	0,57	0,96	3,00	2,17	0,34	2,26	2,65	3,78	0,262	2,01	0,076
		-Y	1,27	1,09	1,92	0,73	0,87	3,43	1,96	0,39	2,26	2,65	2,89	0,378	2,12	0,080
INJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	1,01	58,28	0,31	0,61	9,46	0,32	21,29	0,65	2,55	2,65	18,24	3,195	7,55	0,285
		+X	1,99	10,22	0,27	1,19	3,63	0,28	8,16	0,78	2,55	2,65	2,98	3,430	5,66	0,214
		-X	0,74	10,31	0,45	0,44	6,60	0,45	14,86	0,48	2,55	2,65	6,34	1,626	6,88	0,259
		-X	1,88	19,95	0,28	1,13	10,3	0,29	23,39	1,21	2,55	2,654	3,06	6,520	4,46	0,168
	Y	+Y	0,80	1,04	2,35	0,41	1,25	2,35	2,81	0,29	2,28	2,65	4,34	0,240	2,55	0,096
		+Y	1,00	1,82	2,61	0,54	1,14	2,61	2,58	0,34	2,28	2,65	6,16	0,295	2,29	0,086
		-Y	0,81	0,96	2,58	0,43	1,15	2,59	2,58	0,29	2,65	2,65	4,39	0,219	2,33	0,088
		-Y	1,08	1,88	3,13	0,61	0,95	3,13	2,15	0,35	2,65	2,65	5,41	0,348	2,45	0,092
INJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	1,65	15,78	0,20	0,99	9,54	0,20	21,46	1,02	2,53	2,65	1,93	8,176	7,73	0,292
		+X	2,29	24,63	0,52	1,37	5,67	0,53	12,75	1,28	2,53	2,65	3,45	7,139	4,33	0,163
		-X	1,75	16,12	0,20	1,05	9,21	0,21	20,72	1,08	2,53	2,65	1,90	8,484	7,15	0,270
		-X	2,85	21,08	0,17	1,71	7,39	0,18	16,64	1,77	2,53	2,65	1,30	16,21	5,15	0,194
	Y	+Y	1,18	2,22	2,41	0,65	1,24	2,41	2,79	0,37	2,33	2,65	5,43	0,409	2,71	0,102
		+Y	1,41	1,88	2,99	0,82	1,00	3,00	2,25	0,42	2,33	2,65	4,49	0,419	2,17	0,082
		-Y	1,19	2,05	2,74	0,67	1,09	2,74	2,46	0,37	2,33	2,65	5,74	0,357	2,38	0,090
		-Y	1,44	1,93	3,45	0,84	0,86	3,46	1,95	0,42	2,33	2,65	4,55	0,424	2,17	0,082

Za primerjavo so pomembni rezultati, kot so nihajni čas konstrukcije, SRC in ULSPG, zato so tudi grafično prikazani v obliki grafikonov.

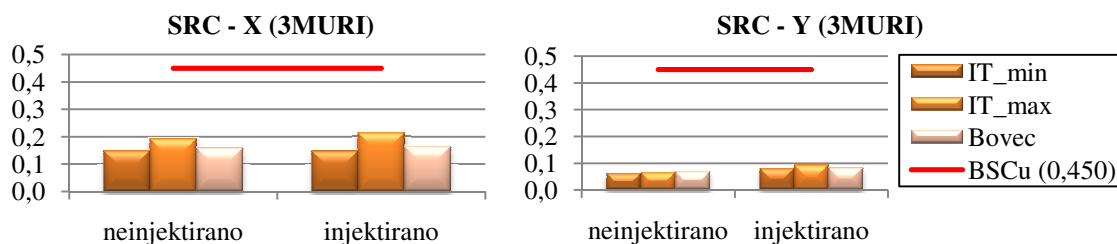


Grafikon 1: Primerjava prvih nihajnih časov, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z zvonikom)

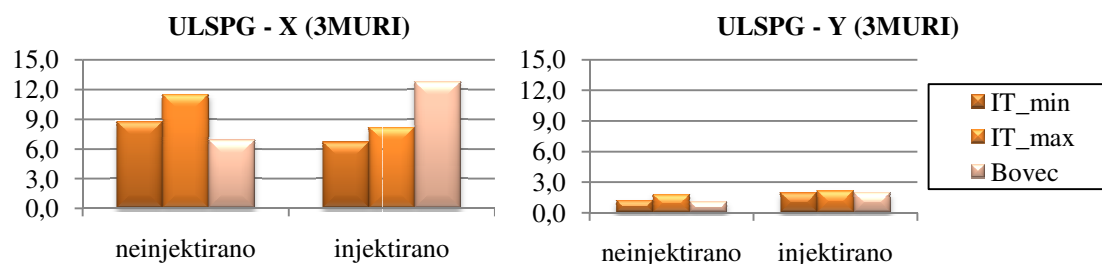
Primerjava SRC-jev (Grafikon 2) in ULSPG-jev (Grafikon 3) je v obliki grafikona prikazana za X in Y smeri potresa glede na spreminjane materialne karakteristike. V Grafikon 2 je zaradi lažje primerjave prikazana tudi vrednost mejnega strižnega koeficienta BSC_u (Base Shear Coefficient), ki predstavlja zahtevano potresno odpornost po EC8.

Za obravnavane objekte znaša mejni strižni koeficient BSC_u po enačbi (8.13):

$$BSC_u = \gamma_1 \cdot \frac{a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0}{q} = \frac{1,2 \cdot 0,225 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,5}{1,5} = 0,450 \quad (9.2)$$

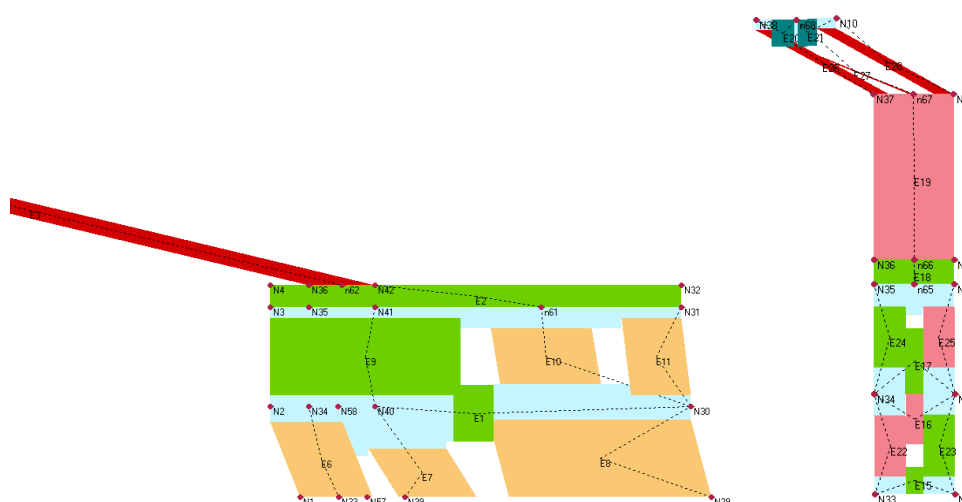


Grafikon 2: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z zvonikom)

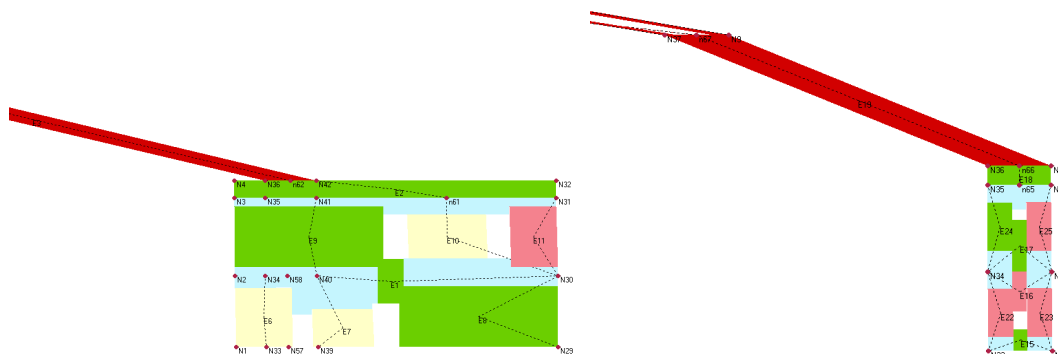


Grafikon 3: Primerjava vrednosti ULSPG za smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu
(3D model z zvonikom)

Stopnjo poškodovanosti stene P1 pri delovanju potresa v X smeri in stene P2 pri delovanju potresa v Y za neinjektirano stanje zidovine lahko opazujemo na sliki 57, medtem ko stopnjo poškodovanosti injektiranih sten lahko opazujemo na sliki 58.



Slika 57: Prikaz poškodb stene P1 (levo) in stene P2 (desno) pred injektiranjem; smer X in Y,
Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z zvonikom)



Slika 58: Prikaz poškodb stene P1 (levo) in stene P2 (desno) po injektiranju; smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z zvonikom)

Iz slik je razvidno, zakaj rezultati, ki so izpisani v preglednicah in grafično prikazani v grafikoni, niso popolni. V določenih primerih analize zgornji del zvonika namreč »odnese«, zato program ne »skonvergira«. To se zgodi tako v primeru računa z materialnimi karakteristikami za neinjektirano, kot tudi z materialnimi karakteristikami za injektirano zidovino. Zato smo v nadaljevanju izdelali 3D model objekta, kjer je zvonik porezan. Višina zvonika je v tem primeru enaka višini ladje.

9.4.1.3.2 Model objekta s porezanim zvonikom

Rezultati nelinearne statične analize, ki je bila opravljena na drugem modelu, so zbrani v preglednici 11 in preglednici 12. Preglednici sta dopolnjeni tudi z rezultati analiz, ki so bile opravljene s programom Sremb (rožnato obarvana polja). Namen prikaza rezultatov, pridobljenih s programom Sremb in obdelanih v naslednjem poglavju, je lažja primerjava rezultatov analiz z obema programoma.

Preglednica 11: Rezultati nelinearne statične analize za neinjektirano stanje zidovine,
Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model s porezanim zvonikom)

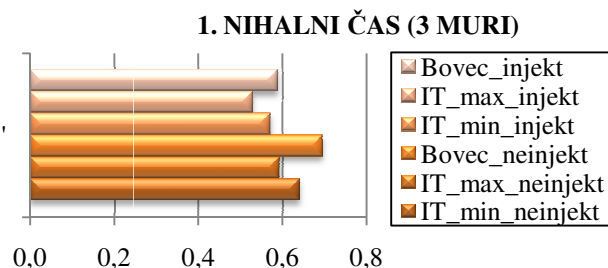
			D _{max} [cm]	D _u [cm]	q*	D _{max} [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s ²]	T* [s]	m*10 ^{^3} [t]	w*10 ^{^3} [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 min	X	+X	1,17	1,42	1,96	0,50	1,15	1,97	2,58	0,20	1,47	2,63	4,05	0,35	4,77	0,181
		+X	1,38	13,50	2,16	0,64	1,38	2,16	3,12	0,22	1,47	2,63	34,69	0,38	4,33	0,164
		-X	1,21	1,19	2,20	0,55	0,99	2,20	2,23	0,20	1,47	2,63	3,90	0,30	4,23	0,161
		-X	1,39	11,54	2,40	0,67	1,24	2,40	2,80	0,23	1,47	2,63	34,47	0,33	3,59	0,137
	SREMB			0,21									1,81	0,11	5,43	0,180
	Y	+Y	2,72	0,91	6,59	1,58	0,36	6,59	0,81	0,36	1,74	2,63	2,93	0,31	1,63	0,062
		+Y	2,93	1,40	6,61	1,71	0,45	6,62	1,02	0,38	1,74	2,63	3,94	0,35	1,63	0,062
		-Y	2,76	0,97	6,77	1,61	0,37	6,77	0,84	0,36	1,74	2,63	3,12	0,31	1,59	0,060
		-Y	2,99	1,45	6,90	1,76	0,43	6,91	0,97	0,39	1,74	2,63	4,12	0,35	1,56	0,059
	SREMB			0,26									2,12	0,12	4,78	0,159
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	0,87	4,64	1,64	0,31	1,82	1,64	4,10	0,17	1,47	2,63	14,92	0,31	5,65	0,215
		+X	1,07	10,48	1,84	0,44	1,62	1,85	3,65	0,19	1,47	2,63	30,61	0,34	5,03	0,191
		-X	0,91	1,24	1,84	0,35	1,23	1,84	2,77	0,17	1,47	2,63	4,64	0,26	5,08	0,193
		-X	1,06	16,41	1,97	0,44	1,52	1,97	3,42	0,19	1,47	2,63	54,43	0,30	4,71	0,179
	SREMB			0,19									1,84	0,10	6,75	0,225
	Y	+Y	2,15	0,86	5,26	1,22	0,44	5,26	0,99	0,30	1,77	2,63	3,14	0,27	2,02	0,077
		+Y	2,37	1,54	5,33	1,36	0,56	5,34	1,26	0,33	1,77	2,63	4,83	0,31	1,97	0,075
		-Y	2,23	0,99	5,37	1,28	0,48	5,38	1,08	0,31	1,77	2,63	3,50	0,28	1,95	0,074
		-Y	2,43	1,55	5,58	1,40	0,53	5,59	1,20	0,34	1,77	2,63	4,91	0,31	1,87	0,071
	SREMB			0,22									2,10	0,10	5,77	0,192
NEINJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec (Posočje)	X	+X	2,35	6,96	2,02	1,21	1,48	2,02	3,34	0,32	1,51	2,63	7,64	0,91	5,29	0,201
		+X	2,69	18,33	2,10	1,44	1,42	2,11	3,20	0,35	1,51	2,63	17,52	1,04	5,05	0,192
		-X	2,36	1,57	2,21	1,23	0,72	2,21	1,62	0,31	1,51	2,63	1,94	0,80	4,78	0,182
		-X	2,68	16,88	2,41	1,45	1,24	2,41	2,79	0,34	1,51	2,63	19,17	0,88	4,40	0,167
	SREMB			0,80									2,08	0,38	6,99	0,232
	Y	+Y	4,40	1,24	6,21	2,64	0,28	6,22	0,63	0,51	1,69	2,63	1,75	0,70	1,82	0,069
		+Y	4,71	1,62	5,66	2,83	0,34	5,66	0,77	0,54	1,69	2,63	1,94	0,83	1,86	0,071
		-Y	4,44	1,19	6,23	2,66	0,26	6,23	0,60	0,51	1,69	2,63	1,67	0,71	1,79	0,068
		-Y	4,79	1,75	5,65	2,88	0,36	5,65	0,82	0,55	1,69	2,63	2,06	0,85	1,84	0,070
	SREMB			0,67									1,88	0,35	5,78	0,192

Preglednica 12: Rezultati nelinearne statične analize za injektirano stanje zidovine,

Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z porezanim zvonikom)

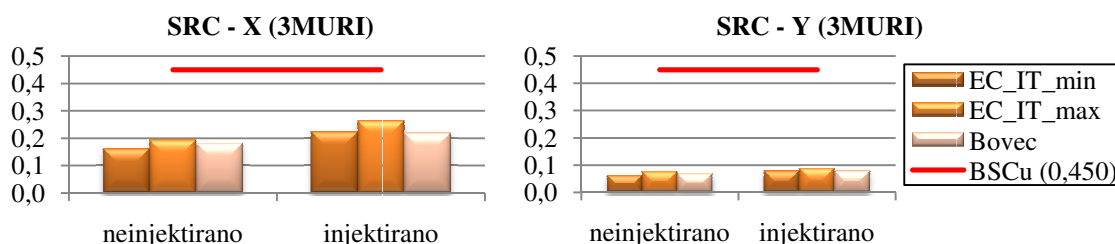
			D _{max} [cm]	D _u [cm]	q*	D _{max} [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s ²]	T* [s]	m*10 ³ [t]	w*10 ³ [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
INJEKTIRANO OPCM 2003 min	X	+X	0,75	4,85	1,55	0,26	1,93	1,55	4,34	0,16	1,47	2,63	17,42	0,27	5,94	0,226
		+X	1,17	2,67	1,91	0,50	1,56	1,91	3,52	0,21	1,47	2,63	7,19	0,37	4,85	0,184
		-X	0,75	0,81	1,57	0,26	1,04	1,57	2,35	0,16	1,47	2,63	2,97	0,27	5,89	0,224
		-X	0,94	16,64	1,83	0,37	1,63	1,84	3,67	0,18	1,47	2,63	58,35	0,28	5,06	0,192
	SREMB			0,171									1,82	0,09	7,26	0,241
	Y	+Y	1,92	0,89	4,72	1,08	0,51	4,73	1,14	0,28	1,78	2,63	3,45	0,25	2,19	0,083
		+Y	2,12	2,45	5,08	1,20	0,59	5,09	1,32	0,31	1,78	2,63	8,72	0,28	2,03	0,077
		-Y	1,98	0,90	4,94	1,11	0,50	4,94	1,13	0,29	1,78	2,63	3,53	0,25	2,08	0,079
		-Y	2,18	2,35	5,45	1,24	0,55	5,46	1,23	0,21	1,78	2,63	8,65	0,27	4,03	0,153
	SREMB			0,204									2,13	0,09	6,32	0,210
INJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	0,59	4,31	1,29	0,23	2,31	1,29	5,21	0,15	1,47	2,63	14,25	0,30	7,21	0,274
		+X	0,93	5,10	1,53	0,36	1,95	1,53	4,40	0,19	1,47	2,63	13,07	0,39	6,08	0,231
		-X	0,56	1,08	1,33	0,21	1,43	1,34	3,22	0,14	1,47	2,63	4,07	0,26	6,93	0,263
		-X	0,77	2,54	1,54	0,27	1,93	1,55	4,35	0,16	1,47	2,63	8,73	0,29	5,98	0,227
	SREMB			0,154									1,86	0,08	9,06	0,301
	Y	+Y	1,52	0,96	3,81	0,82	0,68	3,82	1,53	0,25	1,82	2,63	4,16	0,23	2,59	0,098
		+Y	1,70	1,71	4,33	0,94	0,69	4,33	1,55	0,27	1,82	2,63	7,16	0,23	2,28	0,087
		-Y	1,54	0,85	4,26	0,85	0,60	4,26	1,35	0,25	1,82	2,63	4,10	0,20	2,32	0,088
		-Y	1,72	1,73	4,76	0,96	0,63	4,76	1,41	0,27	1,82	2,63	7,93	0,21	2,08	0,079
	SREMB			0,174									2,13	0,08	7,65	0,255
INJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec (Posočje)	X	+X	0,93	3,12	1,02	0,54	2,14	1,03	4,82	0,23	1,47	2,63	3,55	0,87	9,21	0,350
		+X	1,83	13,16	1,12	1,04	2,67	1,12	6,02	0,32	1,47	2,63	8,54	1,54	8,47	0,321
		-X	0,83	2,67	1,26	0,37	2,15	1,27	4,85	0,19	1,47	2,63	5,43	0,49	7,47	0,284
		-X	1,06	1,44	1,65	0,40	1,23	1,65	2,76	0,20	1,47	2,63	3,54	0,40	5,76	0,219
	SREMB			0,368									1,94	0,19	11,75	0,391
	Y	+Y	2,23	2,16	4,00	1,25	0,74	4,01	1,68	0,32	1,76	2,63	5,50	0,39	2,64	0,100
		+Y	2,44	1,82	4,74	1,39	0,63	4,75	1,42	0,34	1,76	2,63	4,82	0,37	2,24	0,085
		-Y	2,25	1,91	4,56	1,28	0,65	4,56	1,47	0,32	1,76	2,63	5,56	0,34	2,32	0,088
		-Y	2,48	1,85	5,12	1,42	0,58	5,13	1,31	0,34	1,76	2,63	5,20	0,35	2,06	0,078
	SREMB			0,316									1,91	0,16	8,84	0,294

V nadaljevanju so podani enaki grafični prikazi kot za prejšnji model.



Grafikon 4: Primerjava prvega nihajnega časa, Cerkev sv. Urha v Bovcu
(3D model z porezanim zvonikom)

Primerjava prvih nihajnih časov, grafično prikazana v Grafikon 4, pokaže, da največji nihajni čas doseže računski model s karakteristikami iz Bovca za neinjektirano zidovino. Njegova vrednost je 0,68 s medtem, ko je vrednost najkrajšega nihajnega časa 0,55 s. To doseže model s karakteristikami iz Italijanskega standarda za injektirano zidovino. Večja ko je togost konstrukcije manjše nihajne čase konstrukcije dobimo. Iz materialnih karakteristik se opazi, da so po italijanskem standardu elastični in strižni moduli večji in s tem tudi togost konstrukcije.

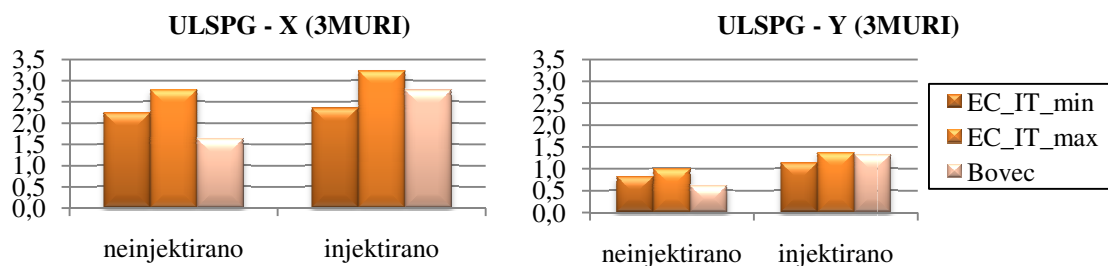


Grafikon 5: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y iz 3Murija,
Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z porezanim zvonikom)

Potresna odpornost v smislu SRC pri potresu v X smeri je za neinjektirano stanje s karakteristikami iz Bovca manjša kot s karakteristikami, pridobljenimi iz Italijanskega standarda (max vrednosti) za približno 6 %, v Y smeri 12 %, po injektiranju pa v X smeri za 18 %, v Y smeri pa za 12 %. Iz grafikonov je lepo razvidno, kako se potresna odpornost ob

injektiranju zidov pri uporabi vseh parov materialnih karakteristik poveča tako v X smeri kot v Y smeri.

BSC_u predstavlja zahtevano potresno odpornost po EC8 in kot vidimo ta ni bila dosežena pri neinjektirani zidovini v nobeni smeri vzbujanja. Iz tega razloga smo preverjali tudi potresno odpornost v primeru sanacijskega ukrepa injektiranja zidovine. Kljub injektiranju potresna odpornost ni bila dosežena. Pri analiziranju potresne odpornosti je bilo ugotovljeno, da je objekt veliko bolj ranljiv v Y smeri. Takšna ugotovitev je bila pričakovana, saj v Y smeri primanjkuje nosilnih zidov. Vrednosti izračunane potresne odpornosti v smislu SRC se gibljejo od 0,06 do 0,08. Situacija je nekoliko boljša, če opazujemo mejne pospeške, kjer te vrednosti v različnih primerih dosežejo okoli polovice zahtevanega projektnega pospeška.

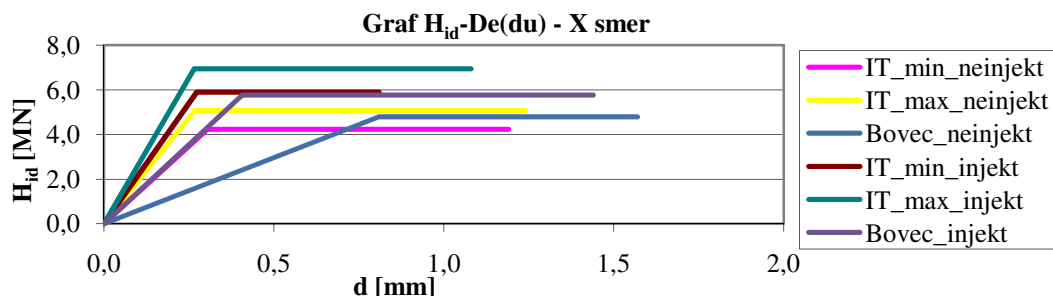


Grafikon 6: Primerjava vrednosti ULSPG-ja za smer X in Y iz 3Murija,
Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z porezanim zvonikom)

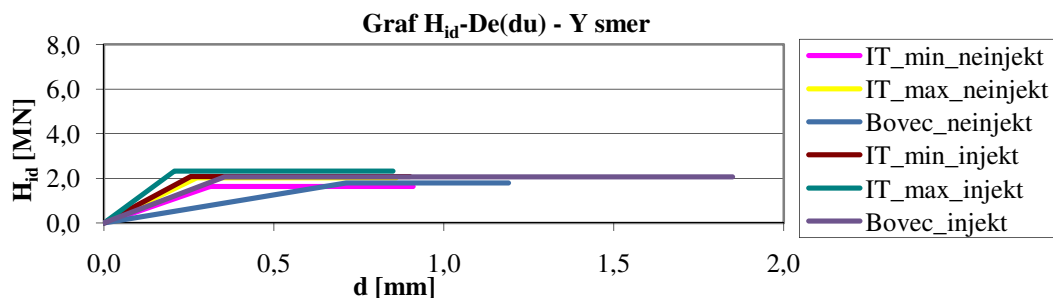
Pospešek tal, ki povzroča porušitev konstrukcije pri potresu v X smeri, je za neinjektirano stanje s podatki iz Bovca manjši kot s podatki iz Italijanskega standarda (max vrednosti) za približno 42 % v smeri X, v Y smeri 38 %, po injektiranju pa v X smeri za 14 %, v Y smeri pa skoraj ni razlik. Iz grafikonov je lepo razvidno, kako se mejni pospešek tal poveča ob injektiranju zidov.

Na spodnjih grafikon tudi grafično vidimo razlike med idealiziranimi odzivi konstrukcije za merodajne primere analize pri uporabi različnih materialnih karakteristik in sicer so za smer X v grafikonu 7, za smer Y pa v grafikonu 8. Opazna je razlika med togostjo konstrukcije ter med izračunanimi mejnimi nosilnostmi in mejnimi pomiki konstrukcije.

Na grafikoni lahko opazujemo togost konstrukcije, se pravi naklon premice.

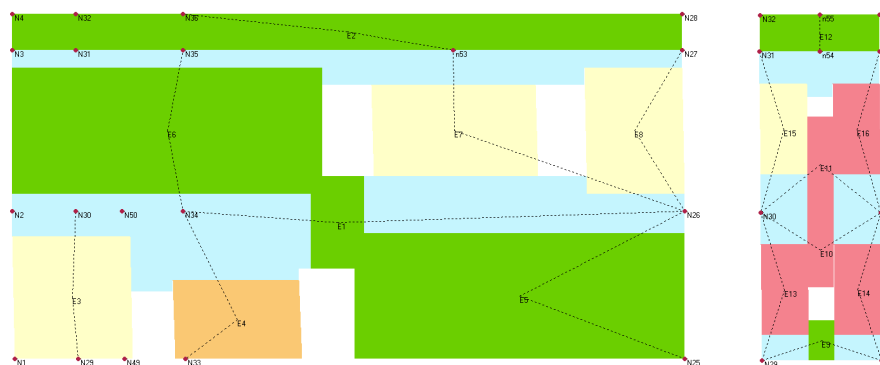


Grafikon 7: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize – smer X, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z porezanim zvonikom)



Grafikon 8: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize - smer Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z porezanim zvonikom)

Pri modelih z injektiranimi zidovi se togost konstrukcije po pričakovanju poveča, kar se lepo vidi iz grafikona, če primerjamo zidovino pred injektiranjem in zidovino po injektiranju. Idealizirana sila H_{id} je v X smeri v povprečju za 2,5 krat večja od idealizirane sile v Y smeri, medtem ko so mejni pomiki v X in Y smeri skoraj enaki.



Slika 59: Prikaz poškodb stene P1 (levo) in stene P2 (desno) pred injektiranjem; smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (3D model z porezanim zvonikom)

Stopnjo poškodovanosti stene P1 pri delovanju potresa v X smeri in stene P2 pri delovanju potresa v Y lahko opazujemo na sliki 59. Materialne lastnosti sten, ki so bile upoštevane pri izračunu so bile pridobljene iz italijanskega standarda (max vrednosti) za neinjektirano zidovino. Stopnja poškodovanosti je prikazana z barvami. Barvna legenda je opisana pod poglavjem Računalniški program Sremb in 3Muri (8). Pri primerjanju stopnje poškodovanosti s katastrom poškodb, vidimo, da program 3Muri daje smiselne rezultate.

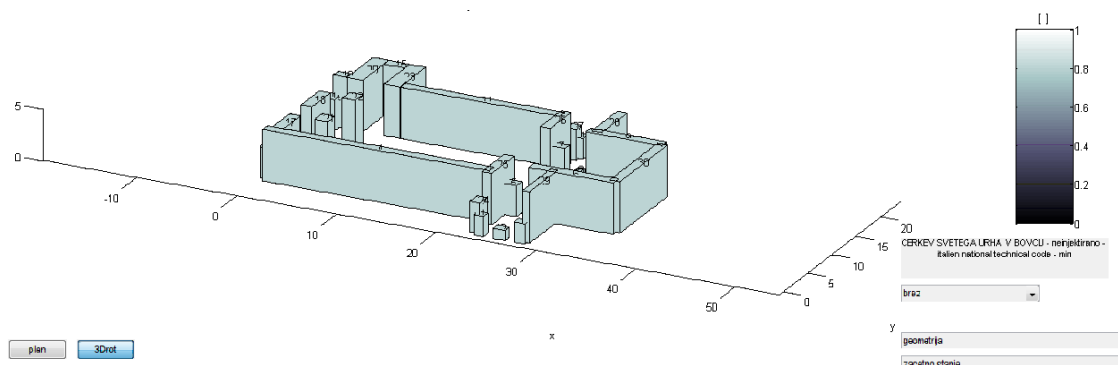
9.4.2 Analiza s programom Sremb

S programom Sremb je bilo narejenih šest nelinearnih statičnih analiz. Analize so se med seboj razlikovale glede na materialne karakteristike, ki so opisane v poglavju Obtežbe in material (6).

9.4.2.1 Modeliranje konstrukcije

Izdelana je bila vhodna datoteka, ki vsebuje podatke o koordinatah težišča, dimenzijah, višini ter vertikalni obremenitvi elementov. Obnašanje elementov med potresno obtežbo je potrebno vnaprej predpostaviti z definiranjem višin, za kar obstaja več priporočil.

Na slika 60 je razvidna geometrija in razporeditev nosilnih zidov oziroma model cerkve v Srembu.

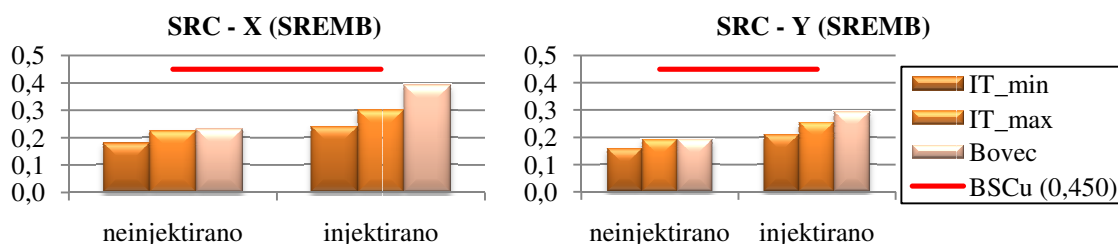


Slika 60: Model v Srembu, Cerkev sv. Urha v Bovcu

9.4.2.2 Rezultati

Rezultati nelinearnih statičnih analiz, ki so bile opravljene s programom Sremb, so tabelarično zbrani v Preglednica 11 in Preglednica 12. Kot že povedano so v teh dveh preglednicah zaradi lažje primerjave združeni rezultati, ki smo jih pridobili s programom 3Muri in s programom Sremb. Vrstica, v kateri so vpisani Sremb rezultati, je obarvana rožnato. Spodaj pa so v Grafikon 9 grafično prikazani rezultati za posamezen primer merodajnih SRC koeficientov ter histerezne ovojnice za smer X in Y.

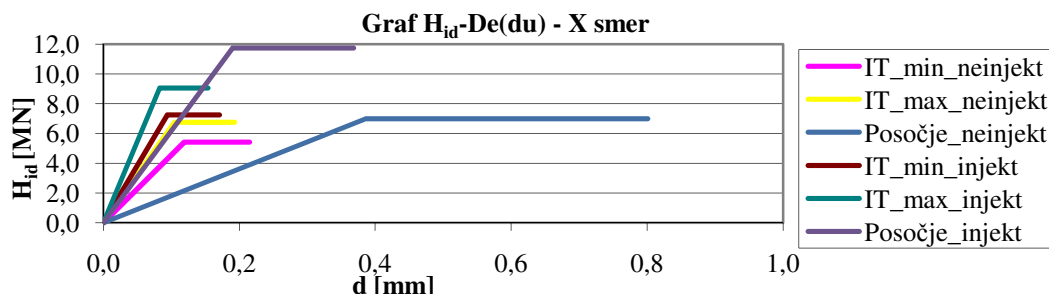
Ugotovitev, da je potresna odpornost v X smeri večja kot v Y smeri, se ne razlikuje z ugotovitvijo za SRC-je, ki smo jih pridobili z programom 3Muri.



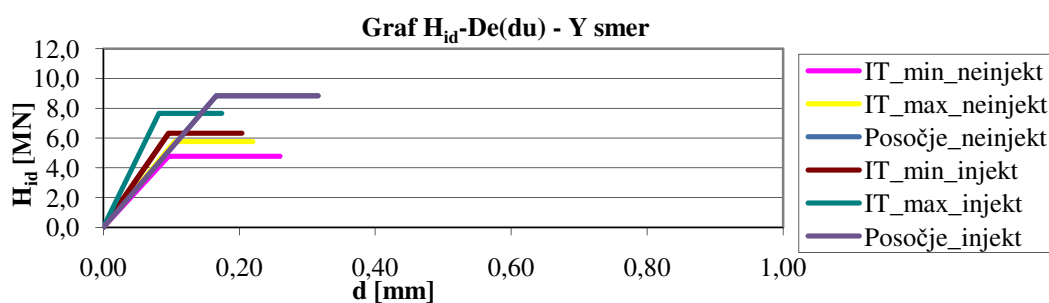
Grafikon 9: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (Sremb)

Največjo vrednosti SRC dobimo s podatki iz Bovca tako za injektirano kot za neinjektirano zidovino za obe smeri vzbujanja. Potresna odpornost BSC_u v skladu z zahtevami standarda

EC 8 tudi v nelinearnih statičnih analizah, ki so bile opravljene s programom Sremb, ni bila dosežena v nobenem primeru.



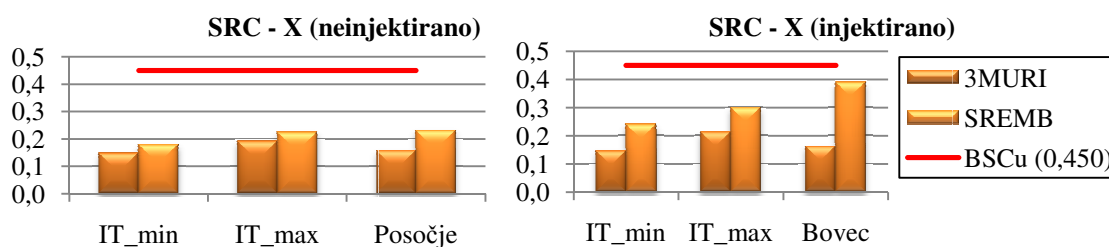
Grafikon 10: Idealizirane histerezne ovojnice merodajne za posamezne primere analize - smer X, Cerkev sv. Urha v Bovcu (Sremb)



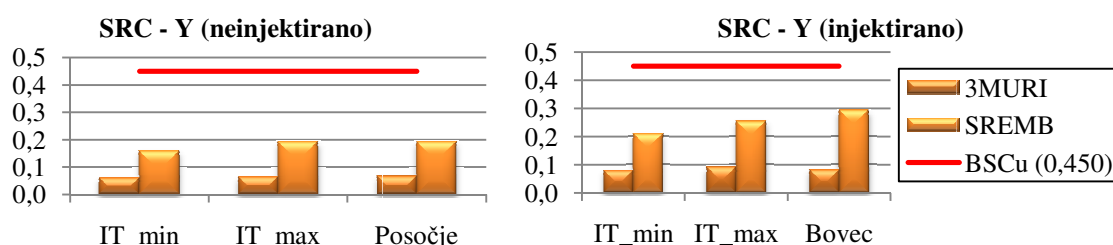
Grafikon 11: Idealizirane histerezne ovojnice merodajne za posamezne primere analize - smer Y, Cerkev sv. Urha v Bovcu (Sremb)

Idealizirane histerezne ovojnice, ki so prikazane v grafikonu 10 in grafikonu 11 tudi tu prikazujejo, da se togost konstrukcije z injektiranjem zidovine povečuje. Idealizirana sila H_{id} pridobljena s programom Sremb, je večja kot jo dobimo s programom 3Muri. Velikosti idealiziranih sil so med 5,4 in 11,8 MN po Srembu in med 4,3 in 6,9 MN po 3Muriju za X smer, za Y smer pa med 4,8 in 8,84 MN po Srembu ter 1,6 in 2,3 MN po 3Muriju. Mejni pomiki, izračunani s programom Sremb, so zelo majhni, veliki le nekaj milimetrov.

V grafikonu 12 in grafikonu 13 je prikazana primerjava SRC-jev, pridobljenih analiz z obema programoma. Velikost SRC-ja program Sremb izračuna sam, pri programu 3Muri pa je potrebno SRC naknadno izračunati iz drugih izračunanih vrednosti, ki jih poda program. Primerjava je prikazana za smer vzbujanja X in Y.



Grafikon 12: Primerjava vrednosti SRC za smer X iz Sremb-a in 3Muri-ja,
Cerkev sv. Urha v Bovcu



Grafikon 13: Primerjava vrednosti SRC za smer Y iz Sremb-a in 3 Muri-ja,
Cerkev sv. Urha v Bovcu

Potresna odpornost BSC_u v skladu z zahtevami standarda EC 8, kot je razvidno iz grafikonov, ni bila dosežena ne s programom Sremb in ravno tako ne s programom 3Muri. Dejstvo, da cerkev med potresom ni bila porušena, implicira na to, da so mogoče zahteve standarda EC8 za sakralne objekte prevelike, oziroma na to, da je potrebno kontrolirati mejne pospeške ULSPG, kjer je situacija nekoliko manj kritična.

Analiza s Srembom potrdi ugotovitev po 3Muriju, da je potresna odpornost stavbe v X smeri večja kot v Y smeri. Pri tem so deleži povečanja potresne odpornosti v X smeri glede na Y smer primerljivi z deleži iz Sremba. Podobno velja za vpliv injektiranja na povečanje togosti konstrukcije.

Če primerjamo same odzive konstrukcije, izračunih z obema programoma, vidimo, da dobimo po Srembu precej bolj tog sistem ter manjše končne pomike kot pri 3Muriju, kar je posledica različnega pristopa modeliranja v obeh primerih. Bistveno večje so po Srembu tudi nosilnosti,

kar je, poleg predpostavljenega etažnega porušnega mehanizma, tudi posledica dejstva, da Sremb pri izračunu odpornosti upošteva tudi zidove, ki stojijo pravokotno na smer obremenjevanja, medtem ko 3Muri le-teh ne upošteva.

10 ANALIZA POTRESNE ODPORNOSTI CERKVE SVETEGA ANTONA V KOBARIDU

10.1 Opis

Cerkev svetega Antona v Kobaridu je evidentirana v registru kulturne dediščine pod evidenčno številko enote 3758. Datacija objekta je zadnja četrtina 17. stoletja oziroma leto 1696, druga četrtina 20. stoletja oziroma leto 1938. Obdobje izgradnje je 16. in 17. stoletje.

Manjša preprosta podružnična cerkev sv. Antona stoji na vrhu griča Gradič nad Kobaridom. Prvotna cerkev je bila dograjena leta 1696. Med leti 1935 in 1938 so jo Italijani zaradi gradnje Kostnice za svoje, med prvo svetovno vojno umrle, vojake skrajšali za približno 3 m in jo dodatno predelali. Cerkev je v središču Kostnice, obdajajo pa jo mnogokotni in koncentrični loki z dvokrakim stopniščem. Kostnico sta oblikovala arhitekt Giovanni Grappi in kipar Giannino Castiglioni.

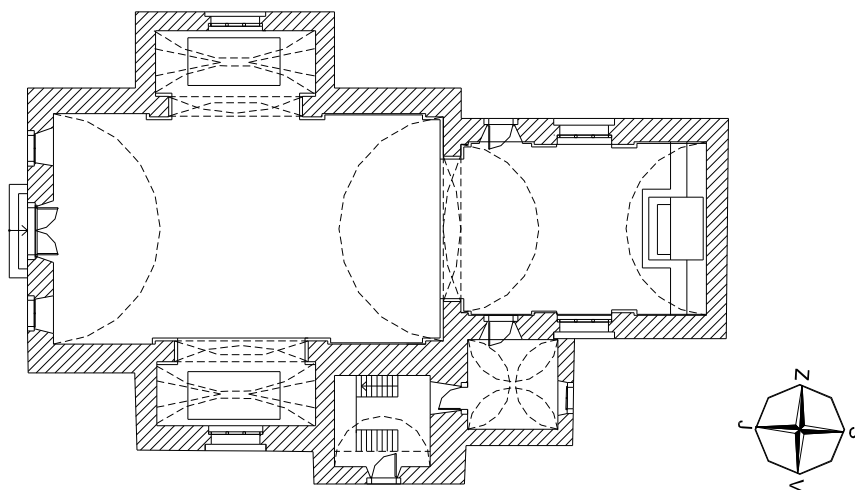


Slika 61: Fotografija Cerkve sv. Antona v Kobaridu

10.2 Zasnova konstrukcije

Osnovo cerkve tvori podolgovata pravokotna ladja s centralno postavljenim glavnim vhodom na zahodni strani in z dvema nišama na severni in južni strani. Od prezbiterja na vzhodni strani jo loči slavoločni zid. Na južni strani ladje sta ob cerkev prislonjena zakristija in zvonik.

Tlorisne dimenzije ladje so 14,2 x 9,4 m, obeh niš 6,5 x 2,5 m, prezbiterja 9,3 x 7,2 m, zakristije 3,5 x 3,5 m in zvonika 5,0 x 4,5 m. Višina čelne stene ladje do slemena je 11,5 m, višina stranske stene ladje do kapi pa 9,0 m nad terenom. Višina zidanega dela zvonika do strehe nad zvonovi je 15,5 m.



Slika 62: Tloris pritličja, Cerkev sv. Antona v Kobaridu

Cerkve ima pasovne kamnite temeljne zidove. Nosilni zidovi so zidani iz kamnitega gradiva in apnene malte.

Debeline kamnitih nosilnih zidov cerkve (ladja z nišama in prezbiterij) v spodnjem delu so od 0,65 do 0,95 m, pri zakristiji pa tudi okoli 0,5 m. Zidovi zvonika so v pritličju debeli od 0,65 do 1,2 m. Zidovi se z višino nekoliko zožijo. Razporeditev nosilnih zidov po tlorisu objekta je v obeh smereh razmeroma ugodna za prevzem potresnih obtežb, saj je v prečni smeri cerkve kar nekaj zidov, vendar pa zidovi niso ustrezno medsebojno povezani.

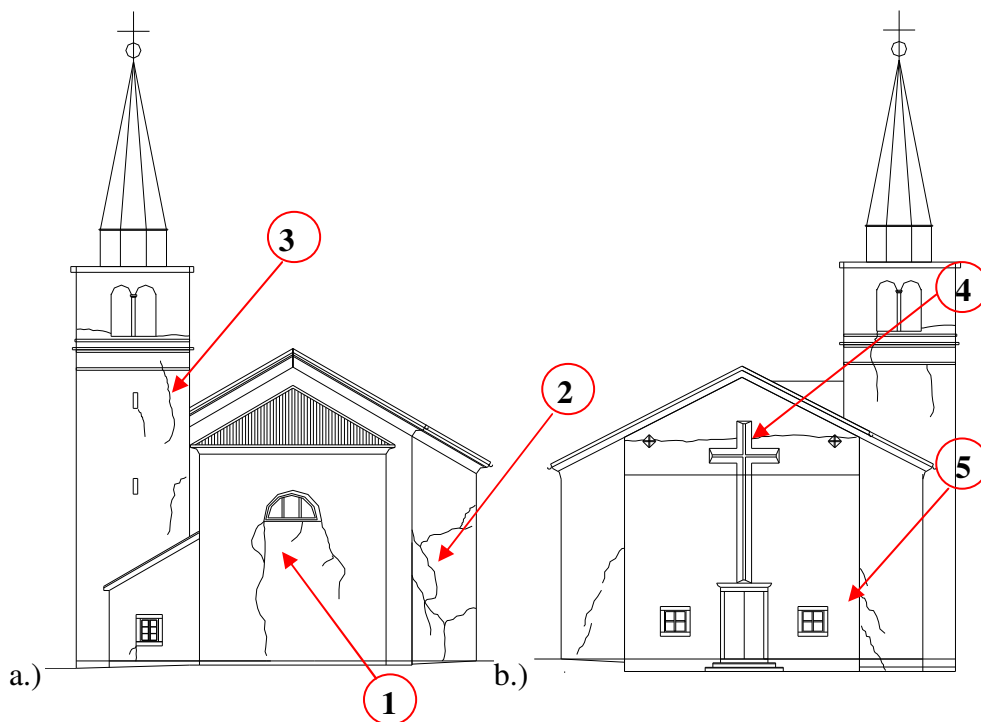
Stropna konstrukcija objekta nad ladjo in prezbiterijem sta kamnita oboka, katerih debelina znaša v temenu od 0,20 do 0,25 m, v ležiščih pa 0,70 m. Utrjen plitek obok iz mešanega materiala debeline 0,20 m je tudi pod zvonovi v zvoniku. Nad zvonovi je armiranobetonska plošča debeline 0,18 m. Preostali podesti v zvoniku so leseni.

Ladjo cerkve s podaljškoma nad nišama pokriva leseno dvokapno ostrešje z nakloni strešin 28°. Nosilni sistem dvokapnice sestavlja šest trikotnih vešal na medsebojni osni razdalji 2,0 m. Trikotna vešala tvorijo natezni povezniki dimenzij od 0,20 do 0,24 m, poševni oporniki dimenzij od 0,20 do 0,20 m in vertikalni natezni elementi s povezniki. Na koncih poveznikov so ležišča opornikov trikotnega vešala v obliki enojnega zaseka. Na zatrepnih zidovih in povezjih slonijo prečne lege dimenzij od 0,15 do 0,15 m na medsebojnem tlorisnem osnem razmiku 1,0 m, na njih pa slonijo letve.

Na drugi strani slavoločnega zidu je podobno dvokapno ostrešje prezbiterija z nekoliko nižjim slemenom in popolnim čopom. Nosilna konstrukcija strehe zakristije je lesena enokapnica, zvonik pa po ravnem zaključku zidanega dela nosi osmerokotno leseno konstrukcijo špice. Strešna kritina je večinoma opečni korec na planetah, na stikih strešnih elementov pa tudi ravna pločevinasta kritina. Špica zvonika je krita z bakreno pločevino.

10.3 Analiza poškodb

Analiza poškodb opisuje stanje objekta in se sklicuje na kataster razpok, ki je bil narejen za vse štiri fasade objekta, in je podana na enak način, kot v prejšnjem primeru.



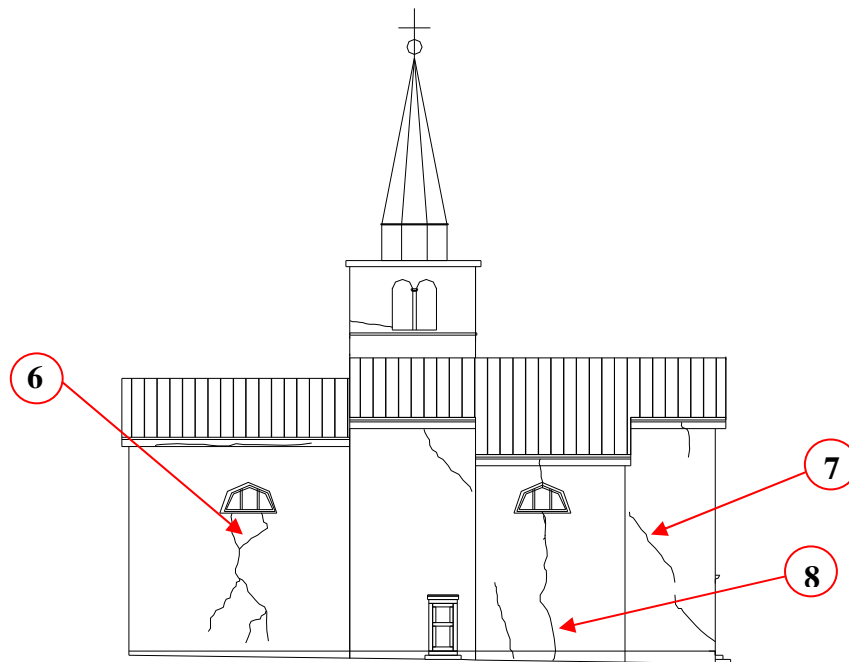
Slika 63: a.) Kataster poškodb - južna fasada in b.) kataster razpok severna fasada,
Cerkev sv. Antona v Kobaridu

Južna fasada

1. Prezbitერი: vertikalne razpoke različnih dolžin. Dolžine razpok od 0,65 do 5,4 m. Mehanizem poškodb: Strižne razpoke prezbiterja oziroma apside (4.17). Prisotnost velikih odprtín, zidovi relativno tanko podprti na veliki razdalji.
2. Niša na zahodni fasadi: vertikalne in horizontalne razpoke po celotni steni. Dolžine razpoke od 4,5 do 10,0 m. Mehanizem poškodb: Sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije (4.25). Velike razlike v globalni togosti posameznih sklopov.
3. Zvonik: vertikalne razpoke. Dolžina razpok 1,0 od do 3,15 m. Mehanizem poškodb: Stolp zvonika (4.27). Zidovina slabe kakovosti in odsotnost povezanosti zidov.

Severna fasada

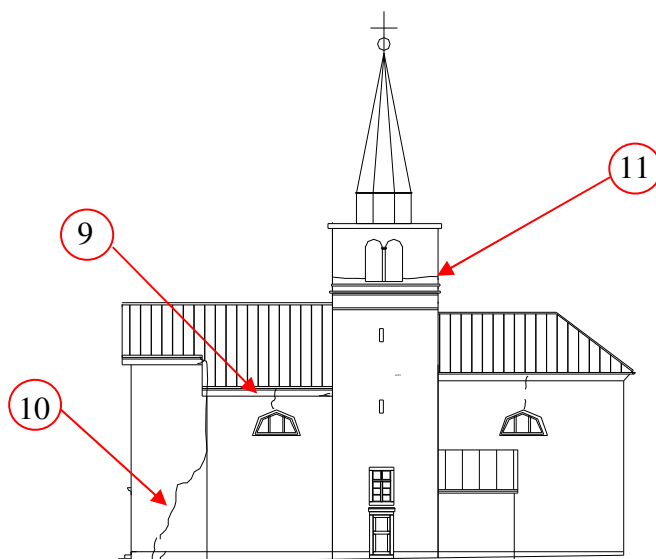
4. Ladja: horizontalna razpoka, ki preseka zid. Dolžina razpoke 37,0 m. Mehanizem poškodb: Prevrnitev fasade (4.1). Slaba povezanost fasadnih in stranskih zidov.
5. Niši na zahodni in vzhodni fasadi: diagonalne razpoke. Dolžine razpok od 0,7 do 2,0 m. Mehanizem poškodb: Sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije (4.25). Velike razlike v globalni togosti posameznih sklopov.



Slika 64: Kataster poškodb - severna fasada, Cerkev sv. Antona v Kobaridu

Zahodna fasada

6. Prezbitერიj: vertikalne in diagonalne razpoke. Dolžina razpok od 1,7 do 5,6 m. Strižne razpoke prezbiterja oziroma apside (4.17). Prisotnost velikih odprtín, zidovi relativno tanko podprti na veliki razdalji.
7. Ladja: diagonalne razpoke. Dolžina razpoke od 2,5 in 3,4 m. Mehanizem poškodb: Strižne razpoke v vzdolžnih zidovih (4.6). Zidovi slabe kakovosti ali pretenki zidovi.
8. Niša na zahodni fasadi: vertikalne razpoke. Dolžina razpok od 2,2 do 6,2 m. Prevelika teža strehe, ki pritiska na zid od niše.



Slika 65: Kataster poškodb - vzhodna fasada, Cerkev sv. Antona v Kobaridu

Vzhodna fasada

9. Niša na vzhodni fasadi: vertikalne razpoke. Dolžina razpok od 0,5 do 0,8 m. Prevelika teža strehe, ki pritiska na zid od niše.
10. Ladja: diagonalne razpoke. Dolžina razpoke 0,6 in 9,5 m. Mehanizem poškodb: Sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije (4.25). Velike razlike v globalni togosti posameznih sklopov.
11. Zvonik: horizontalna razpoka, ki je skoraj presekala zvonik. Dolžine razpok od 1,5 do 1,7 m. Mehanizem poškodb: Preveritev izpostavljenih elementov (4.26). Pomanjkljivo sidranje v osnovo konstrukcije.

10.4 Seizmična analiza

Analiza potresne odpornosti sakralnega objekta je ponovno razdeljena na dva dela; na analizo z računalniškim programom 3Muri in s programom Sremb. Pri analizi s programom 3Muri sta bila narejena 2 sklopa analiz, s programom Sremb pa je bil za primerjavo rezultatov narejen en primer. Primeri so opisani v nadaljevanju.

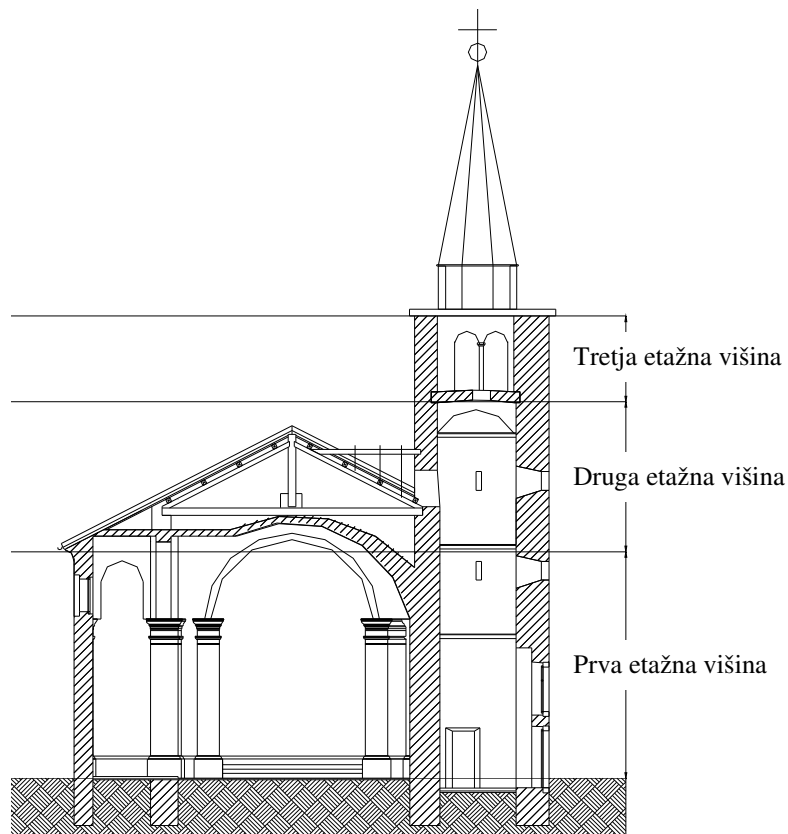
10.4.1 Analiza s programom 3Muri

S programom 3Muri sta bila narejena dva sklopa analiz. V prvem sklopu so bile narejene tri nelinearne statične analize za obe smeri vzburjanja. Te analize se med seboj razlikujejo glede na izbrano kontrolno vozlišče, materialne lastnosti in model objekta pa so enake. Za izbrano vozlišče je bilo v drugem sklopu narejenih šest analiz. Analize se med seboj razlikujejo glede na materialne karakteristike, ki so opisane v poglavju Obtežbe in materiali (6).

10.4.1.1 Modeliranje konstrukcije

10.4.1.1.1 Etažne višine

Pri modeliranju objekta so bile uporabljene tri med seboj različne etažne višine. Bolj podroben potek etažnih višin je razviden iz slike 66.



Slika 66: Etažne višine objekta, Cerkev sv. Antona v Kobaridu

- Prva etažna višina sega do mesta, kjer se zaključi zid niše na vzhodni ali zahodni fasadi oziroma do drugega podesta zvonika. Vzrok za izbiro tako visoke etažne višine so dolge razpoke, ki potekajo skozi celotno etažo.
- Druga etažna višina sega do armirano betonske plošče v zvoniku. Namen izbora take etažne višine je opazovanje zvonika kot celote.
- Tretja etažna višina se zaključi na mestu, kjer ostrešje zvonika nalega na stene zvonika.

10.4.1.1.2 Stropne plošče

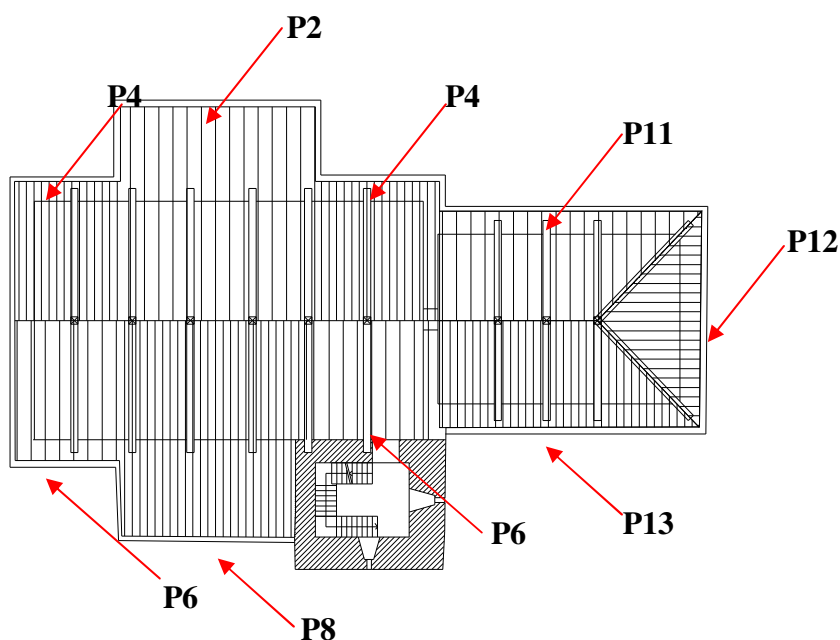
Stropne plošče so bile podane kot plošče nosilne v krajši smeri. V Preglednica 13 je podana lastna površinska obtežba stropnih plošč.

Preglednica 13: Lastna površinska obtežba stropnih konstrukcij, Cerkev sv. Antona v Kobaridu

Stropna plošča	g (daN/m ²)
valjasti obok nad ladjo	146
križni obok nad levo nišo	55
križni obok nad levo nišo	55
valjasti obok nad prezbitorijem	127
zvonik (prva etaža višina)	247
zvonik (druga etažna višina)	475
Zvonik (tretja etažna višina)	342

10.4.1.1.3 Strešna konstrukcija

Velik del obtežbe strešne konstrukcije se prenaša na vzdolžne zidove. Na spodnji sliki je prikazano, kako se lastna teža posamezne strešne konstrukcije prenese na zidove kot linijska obtežba.



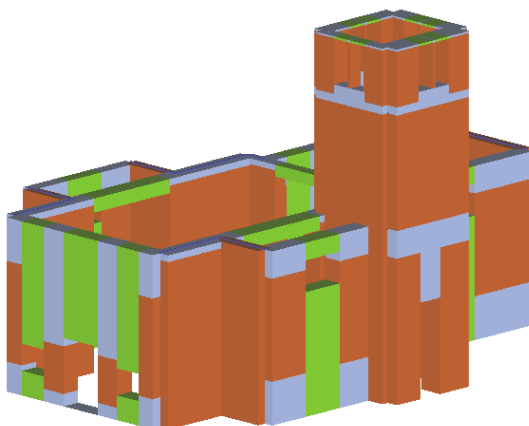
Slika 67: Tloris ostrešja, Cerkev sv. Antona v Kobaridu

V Preglednica 14 so podani zidovi in upoštevana linijska obtežba za posamezne zidove. Poimenovanje zidov je enako, kot ga uporablja 3Muri.

Preglednica 14: Lastna obtežba strešne konstrukcije, Cerkev sv. Antona v Kobaridu

Zid	P2	P4	P6	P8	P11	P12	P13
Linijska obtežba (daN/m)	3745	2326	2326	3745	1078	386	1078

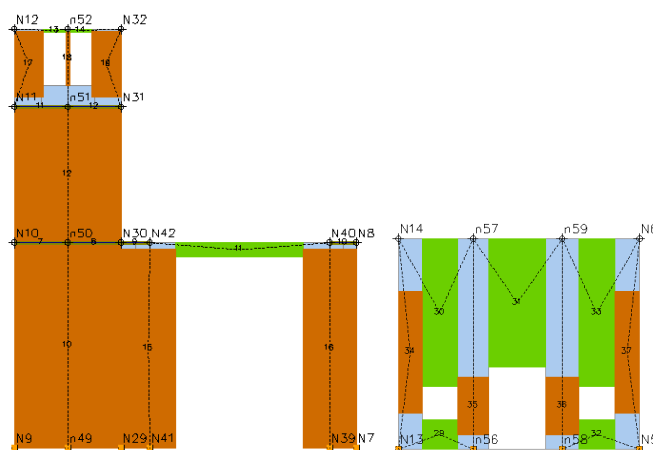
Na sliki 68 je prikazan 3D modela, ki prikazujeta slopove, preklade oziroma parapete in toge odseke.



Slika 68: 3D model objekta, Cerkev sv. Antona v Kobaridu

10.4.1.2 Nelinearna statična analiza

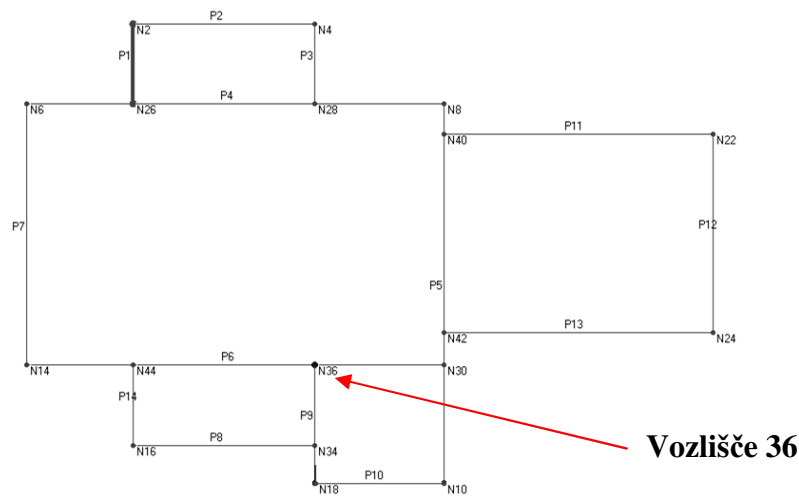
Na sliki 69 sta prikazani mreži dvo-vozliščnih makro-elementov za ravninska zidova 5 in 7. 3Muri ekvivalentni okvir generira pred samo nelinearno statično analizo



Slika 69: Mreži z dvo-vozliščnimi makroelemnti, Cerkev sv. Antona v Kobaridu

Model je sestavljen iz 68 makro-elementov, ki so razporejeni v treh etažah. Ti elementi ležijo v 11 ravninah zidov (označenih na sliki 69), sestavljeni so iz 44 3D vozlišč oziroma 26 2D vozlišč.

Kontrolna točka se je v prvem primeru v sklopu analiz spreminjala in sicer je bila na različnih višinah na istem mestu v tlorisu. Prva kontrolna točka je bila N36 na prvi etažni višini, druga kontrolna točka je bila N37 na drugi etažni višini in tretja N38 na tretji etažni višini. Na podlagi pridobljenih rezultatov smo se odločili za eno vozlišče, ki je postalo kontrolno vozlišče v drugem primeru. Lega izbrane kontrolne točke je prikazana na sliki 70.



Slika 70: Zaporedna števila vozlišč in ravninskih zidov na tlorisu nadstropja,
Cerkev sv. Antona v Kobaridu

10.4.1.3 Rezultati

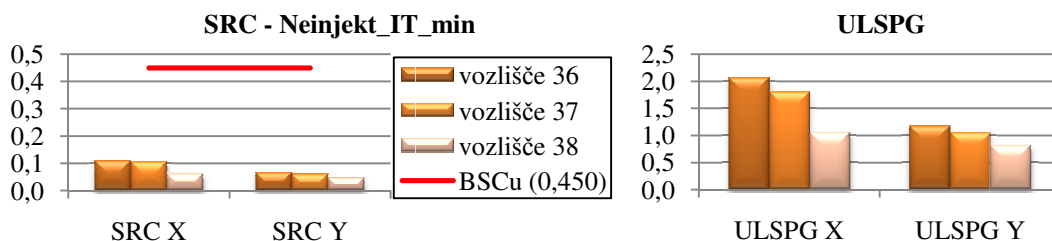
Poglavje rezultati se pri analiziranju cerkve svetega Antona v Kobaridu razdeli na dva dela. V prvem delu so zbrani in grafično obdelani rezultati, ki smo jih pridobili z analiziranjem vozlišč. Namen analiziranja vozlišč je izbrati primerno kontrolno točko. Pri analiziranju vpliva kontrolnega vozlišča se materialne lastnosti zidovine niso spreminjale. V vseh analizah so bili uporabljene materialne lastnosti neinjektirane zidovine iz italijanskega standarda. Po izbrani kontrolni točki so v drugem delu zbrani rezultati analiz spreminjanja materialnih karakteristik na modelu cerkve po enakem principu kot za prvo cerkev.

10.4.1.3.1 Izbira kontrolnega vozlišča

Preglednica 15: Rezultati analize za različne kontrolne točke, Cerkev sv. Antona v Kobaridu

			Dmax [cm]	Du [cm]	q*	Dmax [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s2]	T* [s]	m*10 ^{^3} [t]	w*10 ^{^3} [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
KONTROLNO VOZLIŠČE N36	X	+X	1,43	2,71	3,19	0,78	0,93	3,20	2,11	0,30	1,21	1,42	8,68	0,31	1,58	0,111
		+X	1,45	2,54	3,26	0,79	0,91	3,27	2,06	0,31	1,21	1,42	8,12	0,31	1,55	0,109
		-X	1,42	2,36	2,83	0,76	1,05	2,84	2,37	0,31	1,21	1,42	6,62	0,35	1,78	0,125
		-X	1,45	2,09	2,95	0,78	1,01	2,96	2,28	0,31	1,21	1,42	5,93	0,35	1,71	0,121
	Y	+Y	3,02	3,03	5,73	1,81	0,52	5,73	1,17	0,48	1,10	1,42	5,90	0,51	0,94	0,067
		+Y	3,01	3,00	5,75	1,80	0,52	5,75	1,17	0,48	1,10	1,42	5,88	0,51	0,94	0,066
		-Y	2,79	1,48	5,28	1,66	0,53	5,29	1,20	0,45	1,10	1,42	3,02	0,49	1,03	0,073
		-Y	2,81	2,01	5,56	1,67	0,53	5,57	1,21	0,45	1,10	1,42	4,30	0,46	0,97	0,069
KONTROLNO VOZLIŠČE N37	X	+X	3,05	3,19	3,24	1,63	0,92	3,25	2,07	0,27	0,49	1,42	5,39	0,59	1,55	0,110
		+X	3,56	3,25	3,27	1,95	0,91	3,27	1,80	0,30	0,49	1,42	4,42	0,73	1,50	0,105
		-X	2,99	3,39	2,90	1,57	1,03	2,91	2,32	0,27	0,49	1,42	5,11	0,66	1,74	0,123
		-X	3,48	3,70	3,03	1,88	0,98	3,04	2,22	0,30	0,49	1,42	4,62	0,80	1,66	0,117
	Y	+Y	4,94	3,31	5,73	2,90	0,52	5,73	1,17	0,41	0,55	1,42	4,54	0,72	0,94	0,067
		+Y	5,30	3,48	6,40	3,13	0,46	6,40	1,05	0,43	0,55	1,42	4,75	0,73	0,85	0,060
		-Y	4,83	2,23	5,61	2,83	0,48	5,62	1,07	0,40	0,55	1,42	3,11	0,71	0,97	0,068
		-Y	5,20	3,35	5,90	3,07	0,50	5,91	1,14	0,42	0,55	1,42	4,34	0,77	0,92	0,065
KONTROLNO VOZLIŠČE N38	X	+X	3,81	2,59	3,19	2,02	0,72	3,19	1,63	0,26	0,37	1,42	3,50	0,74	1,59	0,112
		+X	4,68	2,22	5,81	2,67	0,51	5,81	1,14	0,29	0,37	1,42	4,32	0,51	0,87	0,061
		-X	3,79	2,40	3,22	2,02	0,68	3,23	1,55	0,26	0,37	1,42	3,34	0,71	1,56	0,110
		-X	4,65	1,98	5,78	2,65	0,46	5,79	1,05	0,29	0,37	1,42	3,89	0,50	0,87	0,061
	Y	+Y	6,10	3,43	5,72	3,57	0,52	5,72	1,18	0,40	0,43	1,42	3,88	0,88	0,98	0,067
		+Y	6,72	2,38	8,59	3,99	0,34	8,59	0,78	0,43	0,43	1,42	3,46	0,68	0,63	0,045
		-Y	6,00	2,24	5,29	3,50	0,39	5,29	0,89	0,39	0,43	1,42	2,40	0,93	1,02	0,072
		-Y	6,61	2,51	8,26	3,92	0,36	8,26	0,81	0,42	0,43	1,42	3,62	0,69	0,65	0,046

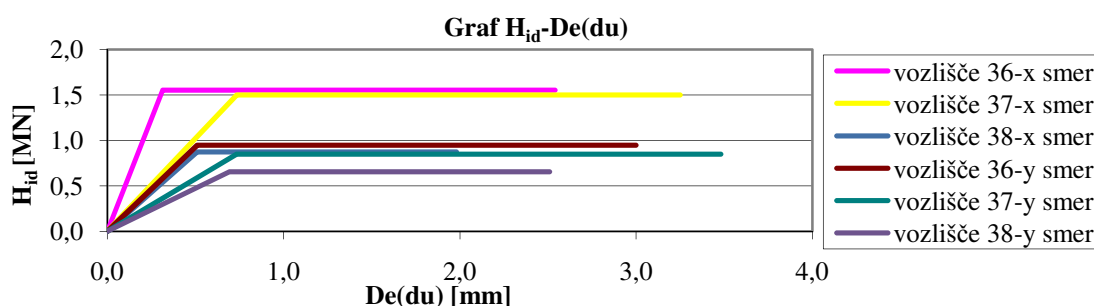
Primerjava SRC-ja in ULSPG-ja za X in Y smer za različna kontrolna vozlišča je prikazana grafično na grafikonu 14.



Grafikon 14: Primerjava vrednosti SRC (levo) in ULSPG (desno) za smer X in Y, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (Izbira kontrolnega vozlišča)

Potresna nosilnost pri potresu v X smeri je večja, kot pri potresu v Y smeri za vsa tri analizirana vozlišča. Razlog za majhne vrednosti SRC-ja je v materialnih lastnostih zidovine, ki je bila uporabljena pri izračunu. Potresna odpornost po zahtevah EC8 ni bila dosežena v nobeni kontrolni točki, kar se vidi iz grafikona, kjer rdeča črta predstavlja zahtevano potresno odpornost po EC8. Največja potresna odpornost v X in Y smeri je bila dosežena v vozlišču N36, ki leži na prvi etažni višini.

Enako kot pri potresni odpornosti SRC je tudi mejni pospešek tal v X smeri večji kot v Y smeri. Glede na to, da so kontrolna vozlišča v različnih etažnih višinah, je opazno, da se z višino mejni potresni pospešek zmanjšuje, njegove vrednosti pa so odvisne tako od mejne nosilnosti kot tudi od mejnih pomikov, za merodajne primere vidnih na spodnjem grafikonu.



Grafikon 15: Idealizirane histerezne ovojnice merodajne za posamezne primere analize - smer X in Y, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (Izbira kontrolnega vozlišča)

Glede na to, da za obravnavani objekt izračune primerjamo med dvema programoma Sremb-3Muri, smo za kontrolno točko izbrali N36. V tej točki sta togost in SRC največja, s čimer se najbolj približamo modelu v Srembu. Namreč pri analiziranju Cerkve sv. Urha v Bovcu smo ugotovili, da s programom Sremb dobimo večjo potresno odpornost in večjo togost kot s programom 3Muri.

10.4.1.3.2 Model objekta – izbrano vozlišče

Rezultati analize, ki je bila opravljena na 3D modelu Cerkve sv. Antona v Kobaridu z različnimi materialnimi karakteristikami, so zbrani v preglednici 16 in 17. Preglednici sta zaradi lažje primerjave ponovno dopolnjeni tudi z rezultati analiz, ki so bile opravljene s programom Sremb (rožnato obarvana polja).

Preglednica 16: Rezultati analize za neinjektirano stanje zidovine,

Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče)

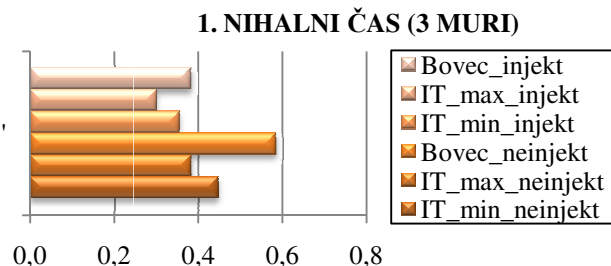
			Dmax [cm]	Du [cm]	q*	Dmax [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s ²]	T* [s]	m*10 ³ [t]	w*10 ³ [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 Min	X	+X	1,43	2,71	3,19	0,78	0,93	3,20	2,11	0,30	1,21	1,4236	8,68	0,31	1,58	0,111
		+X	1,45	2,54	3,26	0,79	0,91	3,27	2,06	0,31	1,21	1,4236	8,12	0,31	1,55	0,109
		-X	1,42	2,36	2,83	0,76	1,05	2,84	2,37	0,31	1,21	1,4236	6,62	0,35	1,78	0,125
		-X	1,45	2,09	2,95	0,78	1,01	2,96	2,28	0,31	1,21	1,4236	5,93	0,35	1,71	0,121
	SREMB			0,229									1,86	0,12	2,50	0,196
	Y	+Y	3,02	3,03	5,73	1,81	0,52	5,73	1,17	0,48	1,10	1,4236	5,90	0,51	0,94	0,067
		+Y	3,01	3,00	5,75	1,80	0,52	5,75	1,17	0,48	1,10	1,4236	5,88	0,51	0,94	0,066
		-Y	2,79	1,48	5,28	1,66	0,53	5,29	1,20	0,45	1,10	1,4236	3,02	0,49	1,03	0,073
		-Y	2,81	2,01	5,56	1,67	0,53	5,57	1,21	0,45	1,10	1,4236	4,30	0,46	0,97	0,069
	SREMB			0,301									2,71	0,11	1,23	0,096
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	0,77	2,72	2,31	0,41	1,29	2,32	2,91	0,26	1,21	1,4236	10,59	0,25	1,78	0,125
		+X	0,79	2,49	2,34	0,42	1,27	2,35	2,87	0,26	1,21	1,4236	9,55	0,26	1,77	0,125
		-X	0,77	2,42	2,07	0,41	1,44	2,07	3,26	0,26	1,21	1,4236	8,14	0,29	2,00	0,141
		-X	0,80	2,34	2,23	0,42	1,34	2,23	3,02	0,27	1,21	1,4236	8,13	0,28	1,90	0,133
	SREMB			0,208									1,89	0,11	3,16	0,248
	Y	+Y	1,79	3,04	3,82	1,08	0,78	3,82	1,76	0,43	1,10	1,4236	6,47	0,47	1,08	0,076
		+Y	1,76	3,06	3,97	1,05	0,75	3,98	1,69	0,42	1,10	1,4236	6,92	0,44	1,06	0,075
		-Y	1,62	2,88	3,89	0,97	0,77	3,90	1,73	0,39	1,10	1,4236	6,99	0,41	1,15	0,081
		-Y	1,64	2,88	3,98	0,98	0,75	3,98	1,69	0,39	1,10	1,4236	7,03	0,41	1,13	0,080
	SREMB			0,233									2,40	0,09	1,52	0,119
NEINJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	1,59	2,73	2,64	0,95	1,13	2,65	2,55	0,41	1,18	1,4236	4,55	0,60	1,64	0,116
		+X	1,60	2,52	2,68	0,96	1,11	2,68	2,51	0,41	1,18	1,4236	4,21	0,59	1,60	0,113
		-X	1,62	2,56	2,16	0,97	1,38	2,16	3,12	0,42	1,18	1,4236	3,42	0,74	1,96	0,138
		-X	1,63	2,27	2,27	0,98	1,32	2,27	2,96	0,42	1,18	1,4236	3,16	0,71	1,85	0,130
	SREMB			0,800									2,15	0,37	3,03	0,238
	Y	+Y	2,96	3,56	2,98	1,77	1,00	2,98	2,26	0,66	1,09	1,4236	3,59	0,99	0,96	0,068
		+Y	2,95	3,65	3,02	1,77	0,99	3,03	2,23	0,66	1,09	1,4236	3,75	0,97	0,95	0,067
		-Y	2,80	3,16	2,94	1,68	1,02	2,94	2,29	0,96	1,09	1,4236	3,32	0,95	0,44	0,031
		-Y	2,81	2,76	2,80	1,69	0,98	2,80	1,52	0,65	1,09	1,4236	2,75	1,00	1,02	0,072
	SREMB			0,803									2,40	0,33	1,73	0,136

Preglednica 17: Rezultati analize za injektirano stanje zidovine,

Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče)

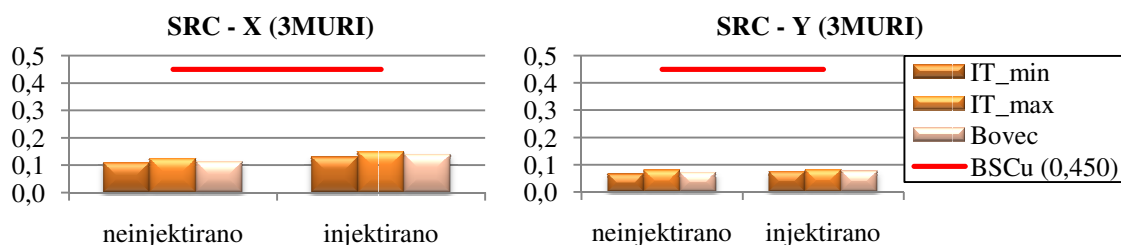
			D _{max} [cm]	D _u [cm]	q*	D _{max} [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s ²]	T* [s]	m*10 ³ [t]	w*10 ³ [t]	ductility	de	H _{id} [MN]	SRC
INJEKTIRANO OPCM 2003 min	X	+X	0,68	2,73	2,21	0,35	1,35	2,22	3,04	0,24	1,22	1,42	12,05	0,22	1,86	0,131
		+X	0,70	2,48	2,24	0,37	1,33	2,24	3,01	0,24	1,22	1,42	10,54	0,23	1,84	0,130
		-X	0,69	2,45	1,99	0,35	1,50	1,99	3,39	0,24	1,22	1,42	9,25	0,26	2,05	0,145
		-X	0,70	2,21	2,09	0,36	1,43	2,09	3,23	0,25	1,22	1,42	8,60	0,25	1,96	0,138
	SREMB			0,181									1,81	0,10	3,45	0,270
	Y	+Y	1,68	3,63	4,01	1,01	0,74	4,01	1,68	0,40	1,10	1,42	8,68	0,41	1,08	0,076
		+Y	1,62	3,41	4,14	0,97	0,72	4,15	1,62	0,39	1,10	1,42	8,82	0,38	1,07	0,075
		-Y	1,48	2,90	3,75	0,88	0,80	3,75	1,80	0,36	1,10	1,42	7,79	0,37	1,19	0,084
		-Y	1,52	2,87	3,64	0,90	0,82	3,64	1,85	0,37	1,10	1,42	7,19	0,39	1,22	0,086
	SREMB			0,207									2,39	0,08	1,62	0,127
INJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	0,53	1,98	1,92	0,25	1,56	1,92	3,51	0,20	1,22	1,42	10,46	0,18	2,11	0,148
		+X	0,54	1,91	1,91	0,26	1,56	1,91	3,52	0,21	1,22	1,42	9,51	0,20	2,11	0,149
		-X	0,54	2,57	1,80	0,25	1,66	1,80	3,74	0,21	1,22	1,42	11,90	0,21	2,25	0,158
		-X	0,55	2,29	1,90	0,26	1,57	1,91	3,53	0,21	1,22	1,42	11,15	0,20	2,12	0,149
	SREMB			0,174									2,00	0,08	4,26	0,333
	Y	+Y	1,42	3,38	3,76	0,83	0,79	3,76	1,79	0,35	1,10	1,42	9,73	0,34	1,17	0,083
		+Y	1,34	3,52	3,81	0,78	0,78	3,81	1,77	0,34	1,10	1,42	11,24	0,31	1,16	0,082
		-Y	1,23	3,86	3,47	0,71	0,86	3,47	1,94	0,32	1,10	1,42	12,79	0,30	1,27	0,089
		-Y	1,27	4,29	3,43	0,73	0,87	3,43	1,96	0,32	1,10	1,42	13,41	0,32	1,28	0,090
	SREMB			0,207									2,80	0,07	1,97	0,154
INJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	0,76	3,44	2,09	0,39	1,43	2,10	3,22	0,26	1,21	1,42	12,19	0,28	1,98	0,140
		+X	0,80	3,19	2,08	0,42	1,44	2,08	3,23	0,27	1,21	1,42	10,45	0,30	1,99	0,140
		-X	0,80	3,84	1,86	0,42	1,60	1,87	3,61	0,27	1,21	1,42	10,81	0,35	2,23	0,157
		-X	0,80	2,56	1,96	0,42	1,52	1,97	3,43	0,27	1,21	1,42	7,75	0,33	2,11	0,148
	SREMB			0,416									2,26	0,18	5,11	0,400
	Y	+Y	1,80	3,61	3,84	1,08	0,78	3,84	1,75	0,43	1,10	1,42	7,70	0,46	1,07	0,076
		+Y	1,76	3,67	3,99	1,06	0,75	4,00	1,68	0,42	1,10	1,42	8,09	0,45	1,08	0,076
		-Y	1,65	5,15	3,87	0,99	0,77	3,87	1,74	0,29	1,10	1,42	12,16	0,42	2,07	0,146
		-Y	1,65	5,22	3,85	0,99	0,77	3,85	1,75	0,399	1,10	1,42	12,21	0,42	1,16	0,082
	SREMB			0,437									3,18	0,13	2,11	0,166

V nadaljevanju so grafično v obliki grafikona prikazani nihajni čas konstrukcije, SRC in ULSPG.



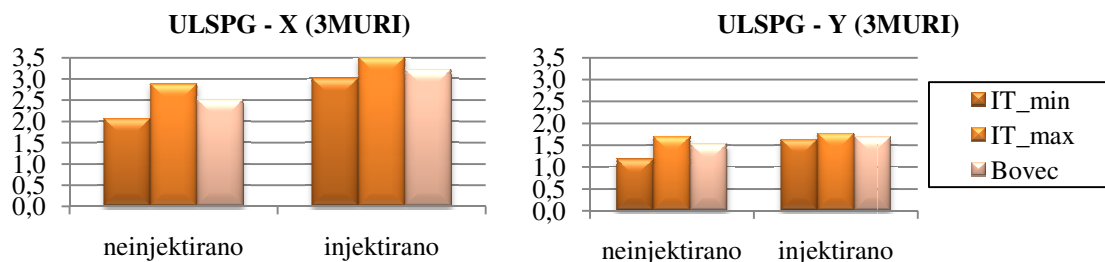
Grafikon 16: Primerjava prvega nihajnega časa, Cerkev sv. Antona v Kobaridu
(model objekta - izbrano vozlišče)

V zgornji polovici grafikona so prikazani rezultati, ki smo jih pridobili iz modelov, ki imajo materialne lastnosti injektiranih zidov in so zato tudi nihajni časi veliko krajši kot v spodnji polovici grafikona. Najdaljši nihajni čas ima model z materialnimi lastnostmi, pridobljenimi iz Bovec, najkrajši čas pa model z boljšimi materialnimi lastnostmi iz italijanskega standarda. Vrednost najdaljšega časa je 0,58 s, vrednost najkrajšega časa pa 0,37 s.



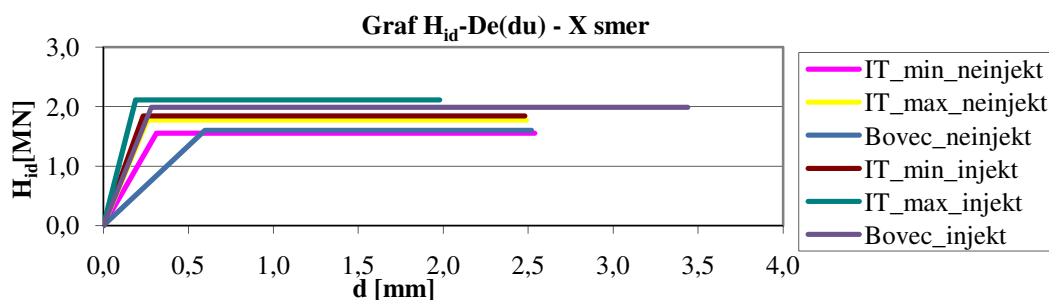
Grafikon 17: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y iz 3Murija, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče)

Zahtevana potresna odpornost BSC_u po EC8 ni bila dosežena v nobenem primeru. Vrednosti SRC, ki smo jih pridobili pri analiziranju tega objekta, so majhne in med seboj zelo podobne.

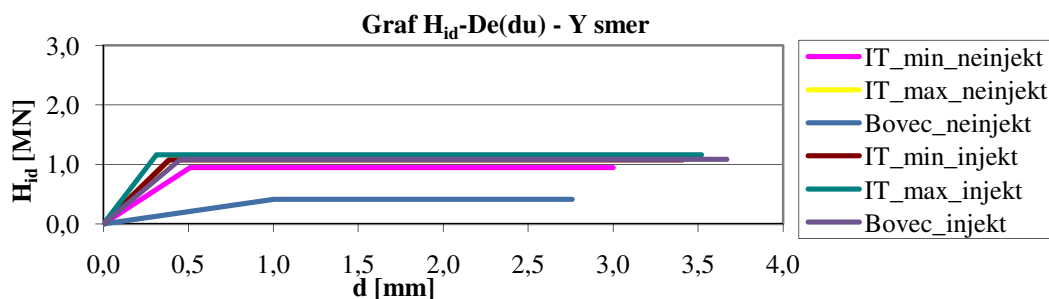


Grafikon 18: Primerjava vrednosti ULSPG-ja za smer X in Y iz 3Murija, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče)

Drugače pa je s pospeški tal, ki so relativno veliki tako v X kot v Y smeri in v skoraj vseh primerih v smeri X presegajo projektni pospešek tal, ki je 0,225g. Največje projektne pospeške dobimo pri analizah z boljšimi materialnimi lastnostmi iz italijanskega standarda, medtem ko najnižje s slabšimi, srednje mejne pospeške pa dobimo s podatki iz Bovca.

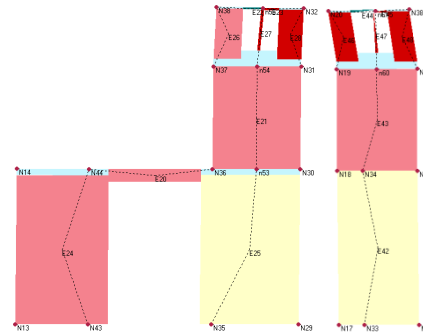


Grafikon 19: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize - smer X, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče)

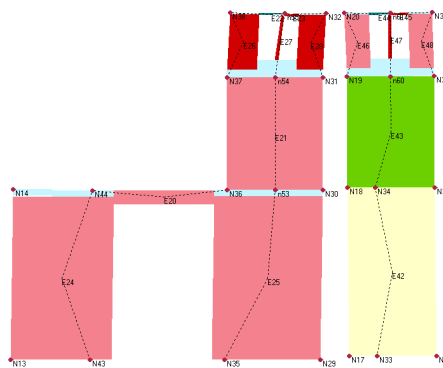


Grafikon 20: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize - smer Y, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče)

Opazna je razlika med togostjo v X in Y smeri. Idealizirane sile so razmeroma majhne glede na mejne pomike, če idealizirane histerezne ovojnice primerjamo z histereznimi ovojnici, ki smo jih pridobili pri cerkvi Svetega Urha.



Slika 71: Prikaz poškodb stene P6 (levo) in stene P9 (desno) pred injektiranjem (podatki-Posočje); smer X in Y, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče)



Slika 72: Prikaz poškodb stene P6 (levo) in stene P9 (desno) po injektiranju (podatki – Posočje); smer X in Y, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (model objekta - izbrano vozlišče)

Če primerjamo stopnjo poškodovanosti zidov pred injektiranjem in po injektiranju (slika 71 in slika 72), vidimo, da se stanje z injektiranjem ne preveč izboljša. Stopnja poškodovanosti je izpisana za približno enake pomike tako v X smeri kot v Y smeri. To pomeni, da le sanacijski ukrep injektiranja zidovine ni dovolj za zagotovitev zahtevane potresne odpornosti.

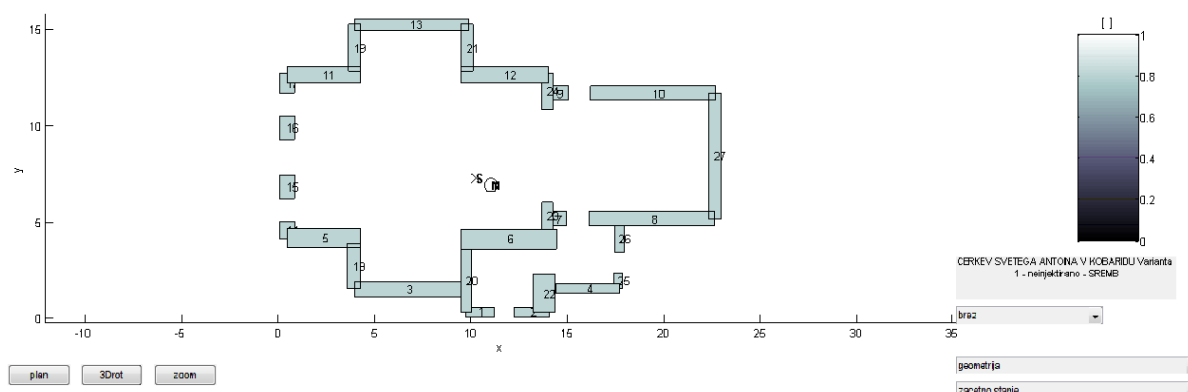
10.4.2 Analiza s programom Sremb

S programom Sremb je bilo narejenih šest analiz ravno tako kot za Cerkev svetega Urha v Bovcu. Analize so se med seboj razlikovale glede na materialne karakteristike.

10.4.2.1 Modeliranje konstrukcije

Vhodna datoteka je bila pripravljena po enakem principu kot za Cerkev sv. Urha v Bovcu. Pravila priprave vhodne datoteke si lahko ogledamo v poglavju Računalniški program Sremb in 3Muri (8.0) pod podglavjem Sremb.

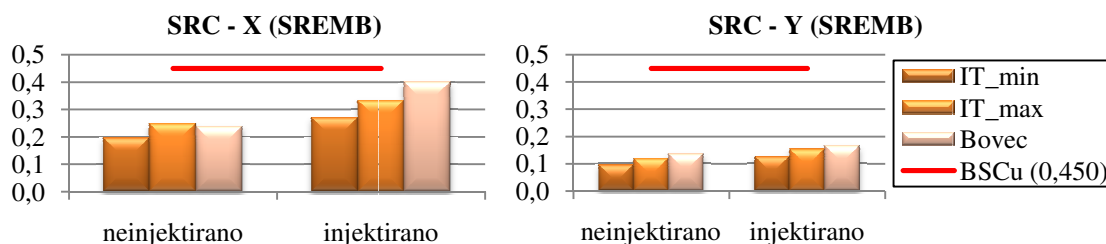
Na spodnji sliki je razvidna geometrija in razporeditev nosilnih zidov (slika 73)



Slika 73: Model v Srembu, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (Sremb)

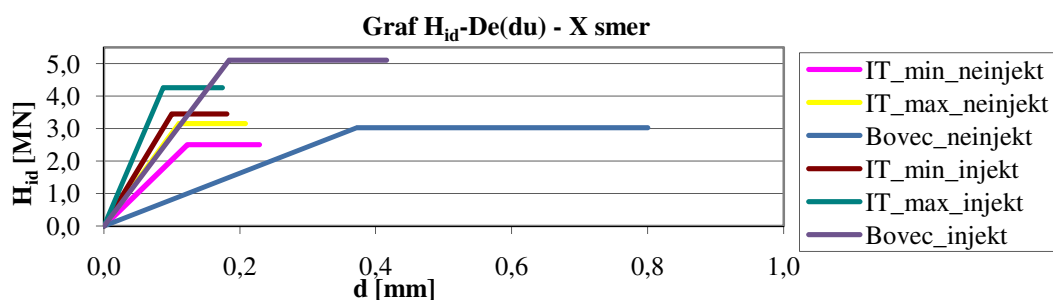
10.4.2.2 Rezultati

Kot pri Cerkvi sv. Urha so rezultati analiz, ki so bile opravljene s programom Sremb, zbrani v preglednici 16 in 17 skupaj z rezultati, ki smo jih pridobili s programom 3Muri, grafično pa so prikazani spodaj.

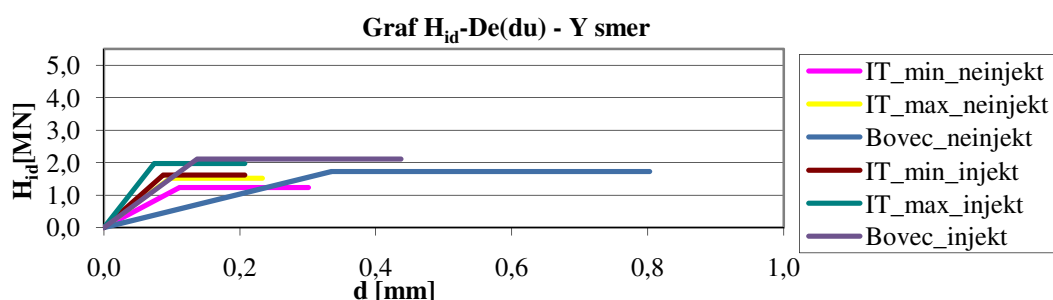


Grafikon 21: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y,
Cerkev sv. Antona v Kobaridu (Sremb)

Iz grafikona 21 je razvidno, da so vrednosti potresne odpornosti v Y smeri manjše kot v X smeri in da se odpornost konstrukcije z injektiranjem povečuje. Največjo odpornost v obeh smereh dosežemo s podatki iz Bovca razen v smeri X za neinjektirano stanje, kar se ujema z ugotovitvijo pri analiziranju Cerkve sv. Urha.

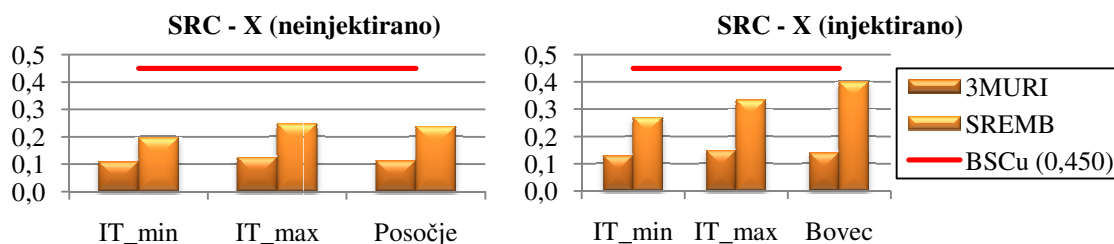


Grafikon 22: Idealizirane histerezne ovojnice merodajne za posamezne primere analize - smer
X, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (Sremb)

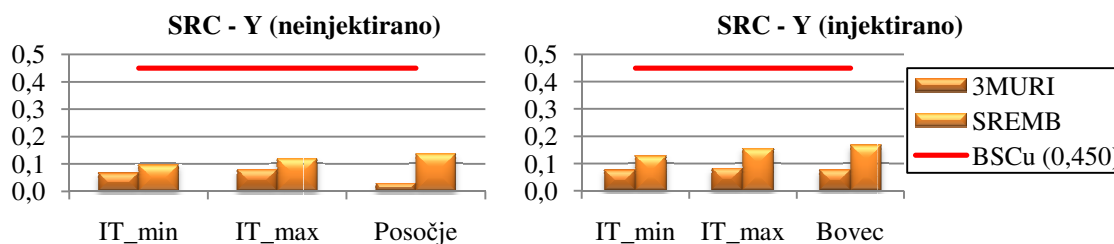


Grafikon 23: Idealizirane histerezne ovojnice merodajne za posamezne primere analize - smer
Y, Cerkev sv. Antona v Kobaridu (Sremb)

Pri primerjanju odzivov same konstrukcije na potresno silo ponovno vidimo veliko togost konstrukcije po injektiranju in razmeroma majhne končne pomike. Velikost idealiziranih sil je med 2,5 in 5,1 MN, končni pomik pa med 0,1 in 0,23 mm za X smer. V Y smeri so vrednosti sil manjše, pomiki pa podobni.



Grafikon 24: Primerjava vrednosti SRC za smer X iz Sremb-a in 3Muri,
Cerkev sv. Antona v Kobaridu



Grafikon 25: Primerjava vrednosti SRC za smer Y iz Sremb-a in 3Muri-ja,
Cerkev sv. Antona v Kobaridu

Analiza s Sremb-om je ponovno potrdila ugotovitve po 3Muri-ju, da je potresna odpornost stavb z zidovino pred injektiranjem in po injektiranju v X smeri večja kot v Y smeri. Enako se je izkazalo pri primerjavi SRC-jev z modelom objekta Cerkev sv. Urha. Potresna odpornost je pri izračunih z Srembom v povprečju večja za polovico od izračunov s programom 3Muri. Vzrok za razlike je v različnih predpostavkah posameznega programa.

11 ANALIZA POTRESNE ODPORNOSTI CERKVE SVETEGA ANTONA PUŠČAVNIKA V ČEZSOČI

11.1 Opis

Cerkev svetega Antona Puščavnika v Čezsoči je evidentirana v registru kulturne dediščine pod evidenčno številko enote 3567. Datacija objekta je druga četrtina 20. stol oziroma leto 1927. Obdobje izgradnje je 20 stoletje.

Cerkev je bila leta 1927 zgrajena na mestu prvotne, ki je bila med 1. svetovno vojno popolnoma porušena. Sezidana je po vzorcu historičnih stilov v neoromanskem slogu. Oltarno sliko je napravila E. Galli 1931.

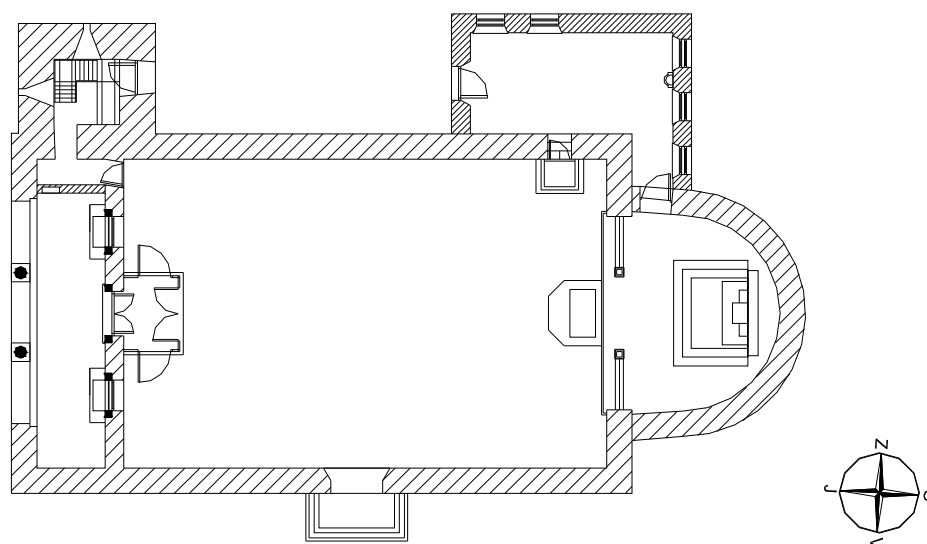


Slika 74: Fotografija Cerkve sv. Antona Puščavnika v Čezsoči

11.2 Zasnova konstrukcije

Osnovo cerkve tvori podolgovata pravokotna ladja s centralno postavljenim glavnim vhodom na južni strani in s stranskim vhodom na vzhodni strani. Prezbitერიj na severni strani ima polkrožno obliko z veliko okni v zgornjem delu. Prezbitერიj in ladjo med seboj ločuje slavoločni zid. Na zahodni strani ladje sta ob cerkev prislonjena zakristija in zvonik.

Tlorisne dimenzije ladje so 18,2 x 10,6 m, prezbiterja 7,4 x 5,1 m, zakristije 7,1 x 3,5 m in zvonika 4,0 x 3,2 m. Višina čelne stene ladje do slemena je 14,1 m, višina stranske stene ladje do kapi pa 9,9 m nad terenom. Višina zidanega dela zvonika do strehe nad zvonovi je 20,3 m.



Slika 75: Tloris pritličja, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči

Cerkev ima pasovne kamnite temeljne zidove. Nosilni zidovi so zidani iz kamnitega gradiva. Debeline kamnitih nosilnih zidov cerkve (ladja in prezbiterij) v spodnjem delu so od 0,55 do 0,75 m, pri zakristiji pa tudi okoli 0,55 m. Zidovi zvonika se po njegovi višini ne spreminjajo, njihova debelina je konstantna, in sicer 1,1 m. Razporeditev nosilnih zidov po tlorisu objekta je v X smeri razmeroma ugodna za prevzem potresnih obtežb, medtem ko je razporeditev zidov v Y smeri neugodna.

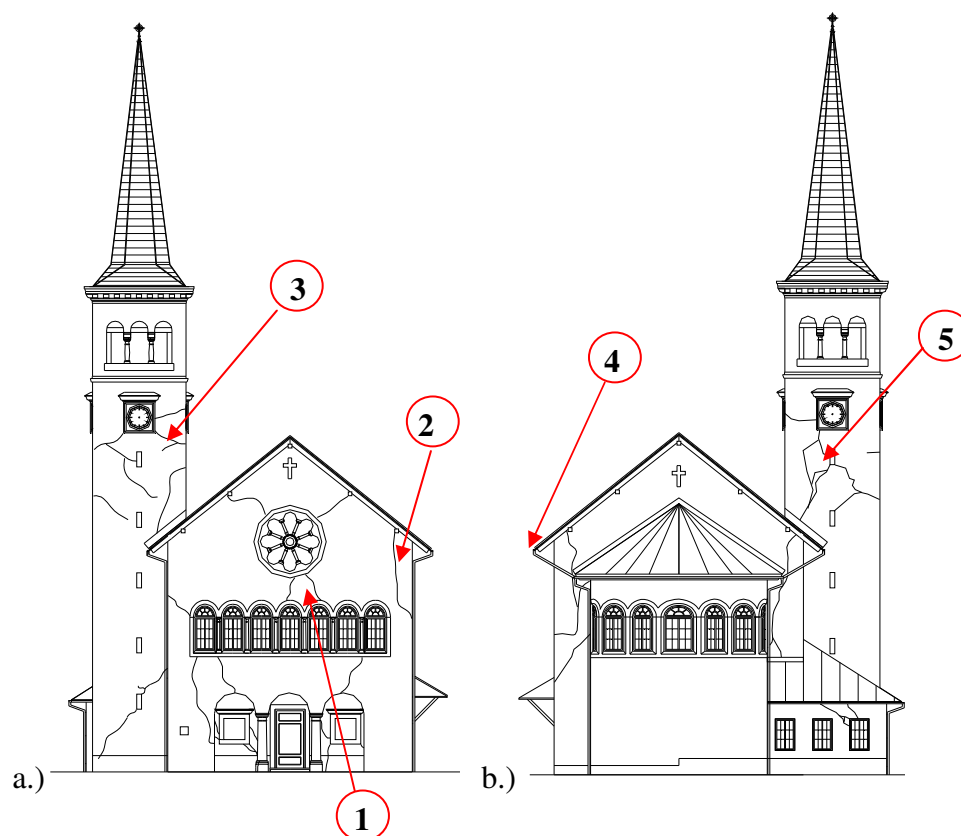
Nad ladjo in prezbiterijem je lesen strop ometan z ometom. Pod zvonovi je armiranobetonska plošča debeline 25 cm, vmesni podesti v zvoniku so leseni. Plošča kora je armiranobetonska.

Ladjo cerkve pokriva leseno dvokapno ostrešje, prekrito s pločevino, nakloni strešin so 35°. Nosilni sistem dvokapnice sestavljajo štiri trikotna vešala na medsebojni osni razdalji 3,2 m. Trikotna vešala tvorijo natezni povezniki dimenzij od 0,20 do 0,24 m, poševni oporniki

dimenzij od 0,20 do 0,20 m in vertikalni natezni elementi. Na zahodnem in vzhodnem zidu ladje slonijo prečne lege dimenzij od 0,28 do 0,22 m na medsebojnim razmiku 3,2 m, ki nosijo leseni valjast obok. Na severni strani ladje je prezbiterij, ki ga pokriva trinajstkotno leseno ostrešje, prekrito s pločevino. Štirikotna lesena konstrukcija nad zvonikom je lesena in prekrita s pločevino.

11.3 Analiza poškodb

Vrsta razpok, dolžina razpoke in mehanizem razpok so podatki, ki so podani pri analizi poškodb. Vse našteje podatke smo pridobili z opazovanjem objekta oziroma iz katastra poškodb, ki je bil narejen za vse štiri fasade.



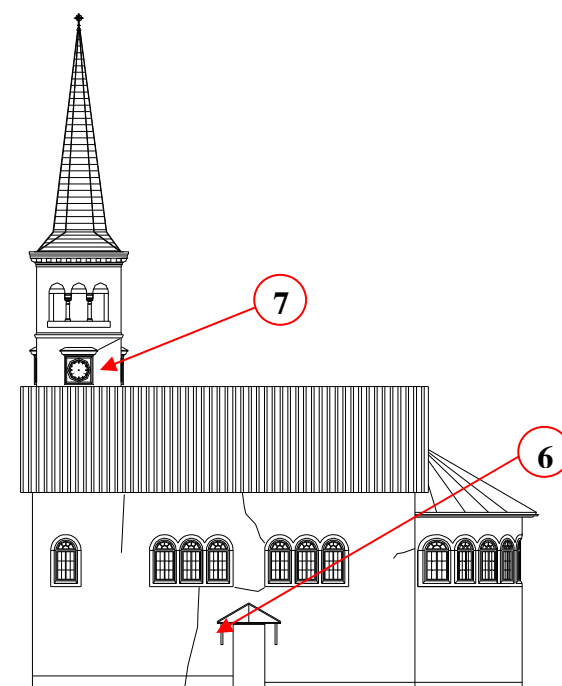
Slika 76: a.) Kataster poškodb - južna fasada in b.) kataster razpok - severna fasada,
Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči

Južna fasada

1. Ladja: diagonalne razpoke, ki potekajo od odprtín do roba fasade. Dolžine razpok od 1,0 do 5,6 m. Mehanizem porušitve: strižne razpoke v ravni fasade (4.3). Prisotnost širokih odprtín, ki lahko poslabšajo fasadni zid.
2. Ladja: vertikalna razpoka, ki se zaključí na robu fasade. Dolžina razpoke od 4,8 m. Mehanizem porušitve: Streha glavna ladja (4.19). Pomanjkanje sider na kontaktu zaključna vez – zidovina.
3. Zvonik: vertikalne in horizontalne razpoke. Dolžina razpok od 0,8 do 3,5 m. Mehanizem poškodb: Stolp zvonika (4.27). Zidovina slabe kakovosti in odsotnost povezanosti zidov.

Severna fasada

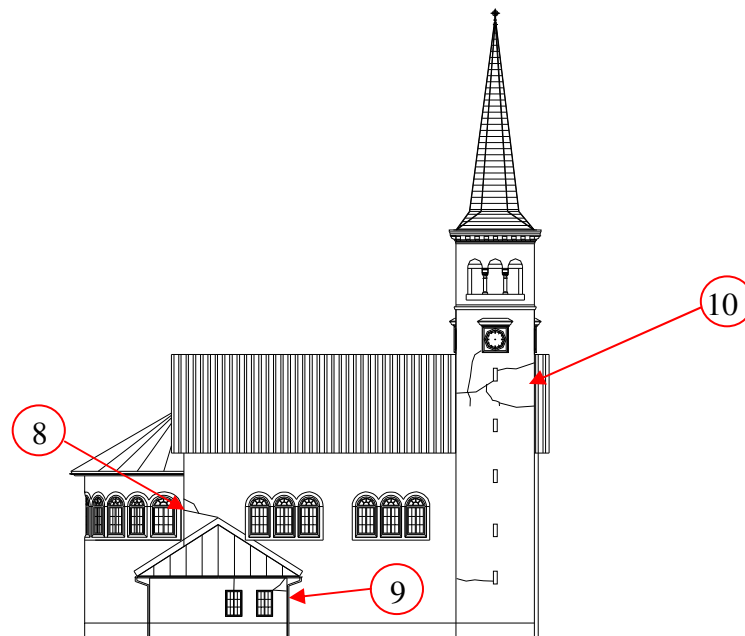
4. Ladja: vertikalne in horizontalne razpoke, ki se zaključijo na robu fasade. Dolžine razpok od 0,9 do 6,4 m. Mehanizem poškodb: Streha glavna ladja (4.19). Pomanjkanje sider na kontaktu zaključna vez – zidovina.
5. Zvonik: vertikalne in horizontalne razpoke. Dolžina razpok od 0,5 do 2,5 m. Mehanizem poškodb: Stolp zvonika (4.27). Zidovina slabe kakovosti in odsotnost povezanosti zidov.



Slika 77: Kataster poškodb - vzhodna fasada, Cerkev sv. Antona Pušcavnika v Čezsoči

Vzhodna fasada

6. Ladja: diagonalne in vertikalne razpoke. Dolžina razpok od 1,1 do 5,2 m. Mehanizem porušitve: streha glavna ladja (4.19). Povečana teža strehe.
7. Zvonik: diagonalna razpoka dolžine 1,2 m. Mehanizem porušitve: strižne razpoke v ravni fasade (4.3). Prisotnost široke odprtine, ki je poslabšala nosilnost zidu zvonika.



Slika 78: Kataster poškodb - vzhodna fasada, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči

Vzhodna fasada

8. Ladja: diagonalna razpoka, stik ladja zakristija. Dolžine razpok od 0,8 do 2,6 m. Mehanizem porušitve: sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije (4.25). Pomanjkanje zidanih vezi pri stikovanju različnih sklopov.
9. Zakristija: diagonalne in vertikalne razpoke. Dolžine razpok od 0,5 do 0,8 m. Mehanizem porušitve: strižne razpoke v ravni fasade (4.3). Prisotnost širokih odprtin, ki lahko poslabšajo fasadni zid.
10. Zvonik: vertikalne in horizontalne razpoke. Dolžine razpok od 1,2 do 4,0 m. Mehanizem porušitve: stolp zvonika (4.27). Zidovina slabe kakovosti in odsotnost povezanosti zidov.

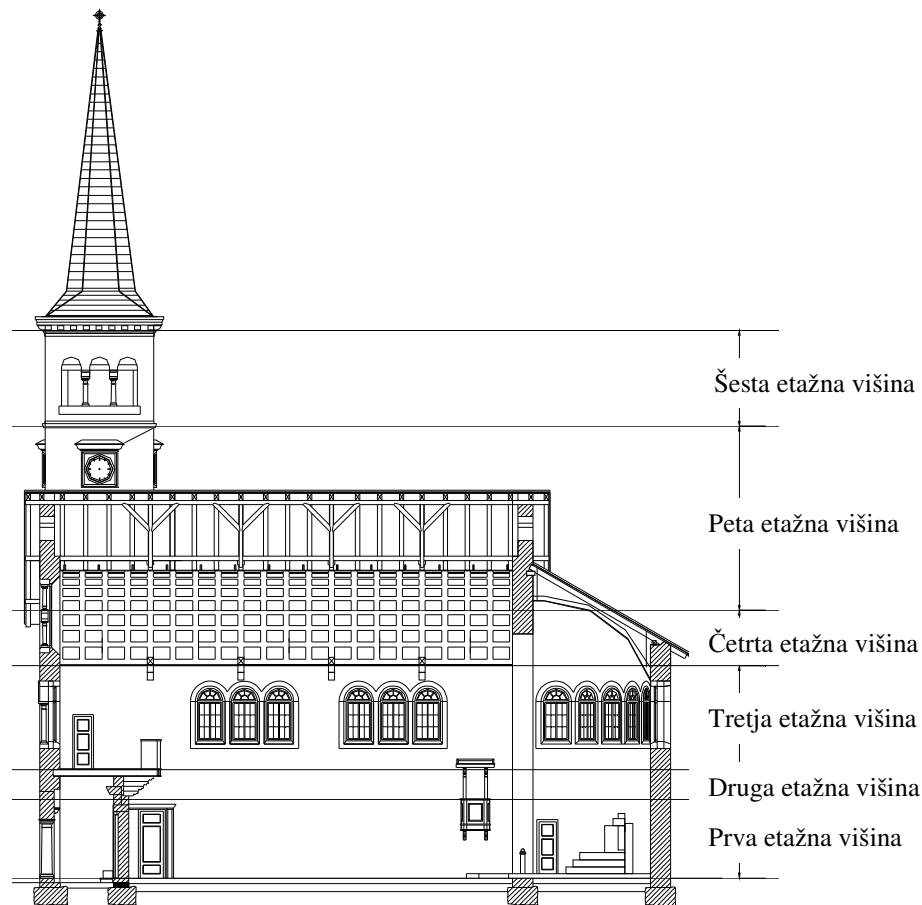
11.4 Seizmična analiza

Analiza potresne odpornosti zgoraj navedenega sakralnega objekta je bila narejena le z računalniškim programom 3Muri. Narejena sta bila dva modela zaradi iskanja primerne modela. V prvem je modeliran celoten zvonik, v drugem pa je zvonik porezan. Višina zvonika je pri slednjem enaka višini ladje, lastna teža zvonika pa prenesena na preostali del zvonika kot linijska obtežba. Za vsak model je bilo narejenih šest analiz za obe smeri vzbujanja. Analize so se med seboj razlikovale glede na materialne karakteristike, ki so opisane v poglavju Obtežbe in materiali (6).

11.4.1 Modeliranje konstrukcije

11.4.1.1 Etažne višine

Pri modeliranju prvega modela objekta je bilo uporabljenih pet etažnih višin, medtem ko so bile uporabljene tri etažne višine za drugi model. Vse etažne višine so med seboj različne. Bolj podroben potek etažnih višin je razviden iz slike 79.



Slika 79: Etažne višine objekta, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči

- Prva etažna višina se zaključí na mestu, kjer se zaključí zid zakristije na zahodni strani objekta. Namen te etažne višine je, da so stene zakristije modelirane kot celota.
- Druga etažna višina se zaključí pod korom, saj je le tako mogoče upoštevati kor v modelu.
- Tretja etažna višina se zaključí na mestu, kjer strop prezbiterija in strop ladje nalegata na zunanje zidove. Ta etažna višina je tudi najbolj zanimiva glede na to, da je v tej etažni višini največ odprtín in je tudi pri potresu 2004 v tem območju nastalo veliko razpok.
- Četrta etažna višina se zaključí na vrhu zidov ladje oziroma na enem izmed podestov v zvoniku.

- Peta etažna višina se zaključi nad zadnjim armirano betonskim podestom v zvoniku zaradi precej velike debeline plošče. Vzrok za takšno debelino plošče je velika teža zvonov v zvoniku. Peta etažna višina velja za najvišjo etažno višino.
- Šesta etažna višina se zaključi na mestu, kjer ostrešje zvonika nalega na stene zvonika.

11.4.1.2 Stropne plošče

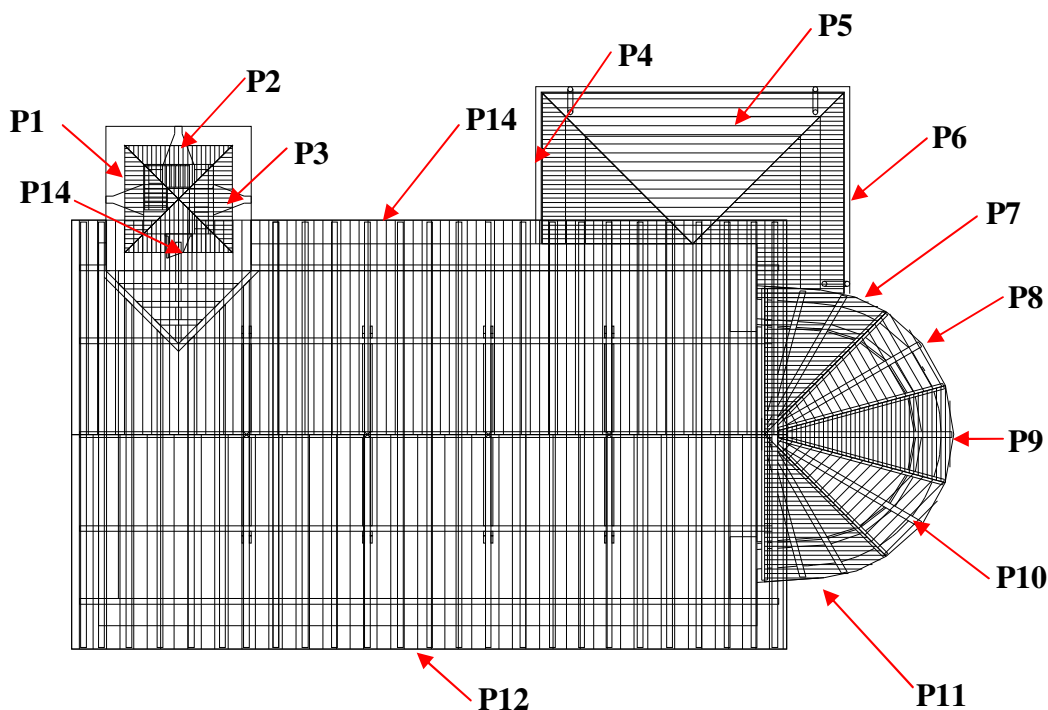
Stropne plošče so bile podane kot plošče nosilne v krajši smeri. V preglednici 18 je podana lastna površinska obtežba stropnih plošč, ki je uporabljena v obeh modelih.

Preglednica 18: Lastna površinska obtežba stropnih plošč,
Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči

Stropna plošča	g (daN/m ²)
nad zakristijo	380
kor	475
nad ladjo	84
nad prezbiterijem	84
v zvoniku (4 etaža)	25
v zvoniku (spodnje etaže)	228
v zvoniku (pod zvonom)	380

11.4.1.3 Strešna konstrukcija

Velik del obtežbe strešne konstrukcije se prenaša na vzdolžne zidove. Na sliki 80 je prikazano, kako se lastna teža posamezne strešne konstrukcije prenese na zidove kot linijska obtežba. Takšna razporeditev strešne obtežbe velja za oba modela.



Slika 80: Tloris ostrešja, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči

V preglednici 19 so podani zidovi in upoštevana linijska obtežba na posamezne zidove. Takšno poimenovanje zidov uporablja 3Muri. Pri zidu P14 sta v preglednici podani dve vrednosti za linijsko obtežbo, prva se nanaša na del zidu nad ladjo, druga v oklepaju pa na zid zvonika.

Preglednica 19: Lastna obtežba strešne konstrukcije, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči

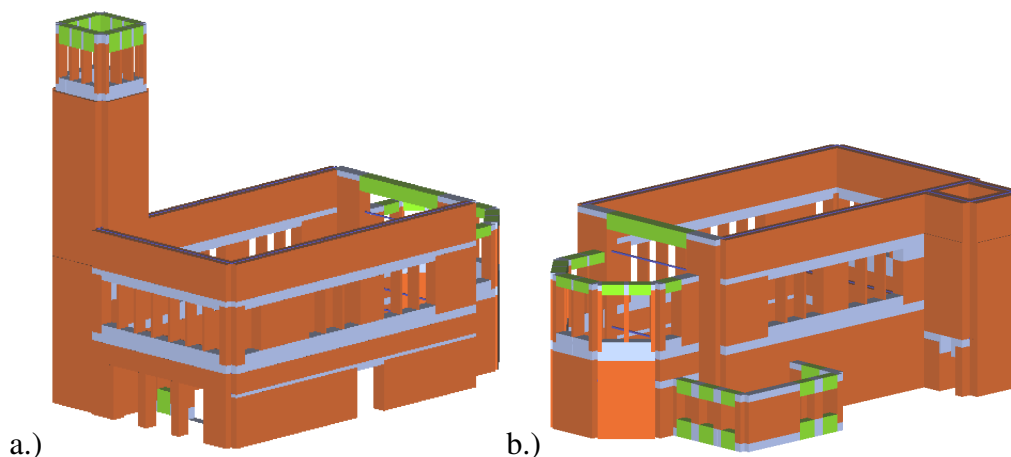
Zid	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P14
Linijska obtežba(daN/m)	115	115	115	73	148	128	160	160	160	160	160	1072	1072(115)

11.4.1.4 Zvonik

Obtežba skrajšanega dela zvonika se na model prenese kot linijska obtežba na zidove. V preglednici 20 so podani zidovi in upoštevana linijska obtežba na posamezni zid v zvoniku, na sliki 58 pa sta prikazana oba 3D modela.

Preglednica 20: Lastna obtežba zvonika, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči

Zid	P1	P2	P3	P14
Linijska obtežba(daN/m)	15956	15956	15956	15956

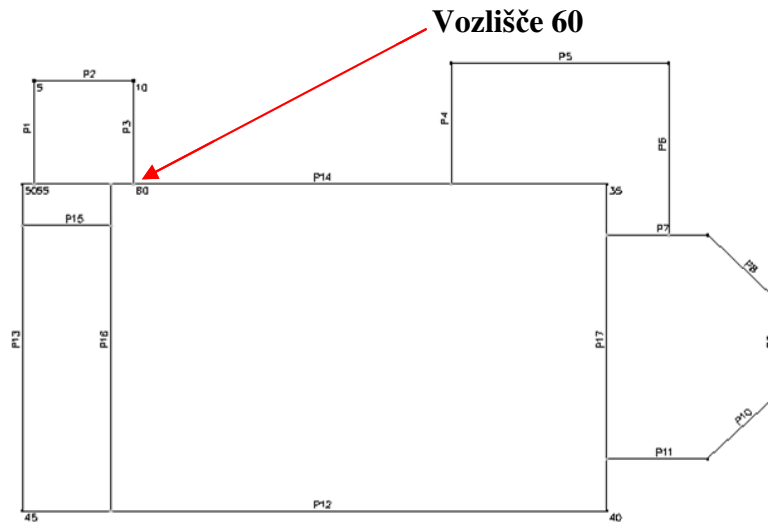


Slika 81: a.) 3D model z zvonikom in b.) 3D model z porezanim zvonikom,
Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči

11.4.1.5 Nelinearna statična analiza

Prvi model v 3Muriju je sestavljen iz 155 makro-elementov, ki so razporejeni v šestih etažah. Ti elementi predstavljajo 17 ravninskih zidov (označenih na sliki 81) in so sestavljeni iz 92 3D vozlišč oziroma 80 2D vozlišč. Drugi model je sestavljen iz 123 elementov, ki so razporejeni v štirih etažah. Ti elementi predstavljajo 17 ravninskih zidov (označenih na sliki 81) in so sestavljeni iz 84 3D vozlišč oziroma 67 2D vozlišč.

Kontrolna točka je v obeh modelih vozlišče 60. Lega izbrane kontrolne točke je prikazana na sliki 82.



Slika 82: Zaporedna števila vozlišč in ravninskih zidov na tlorisu nadstropja,
Cerkev sv. Antona Pušcavnika v Čezsoči

11.4.2 Rezultati

Poglavje rezultati se razdeli na dva podpoglavja. V prvem podpoglavju so zbrani in obdelani rezultati analiz, narejenih na 3D modelu z zvonikom, v drugem podpoglavju pa rezultati analiz na 3D modelu s porezanim zvonikom.

Šest različnih primerov analiz s spremenjenimi materialnimi karakteristikami je bilo narejenih za vsak 3D model enako kot pri prejšnjih objektih. Rezultati so razdeljeni v dveh preglednicah glede na to, ali je zidovina injektirana ali ne. Vrednosti v rumeno obarvanih poljih so uporabljene za izris grafikonov. Polja, ki so obarvana sivo, pomenijo, da so vpisane vrednosti nelogične glede na preostale rezultate. Če pa so polja v preglednicah prazna, to pomeni nestabilen model.

11.4.2.1 Model objekta z zvonikom

Preglednica 21: Rezultati analize za neinjektirano stanje zidovine,

Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči (3D model objekta z zvonikom)

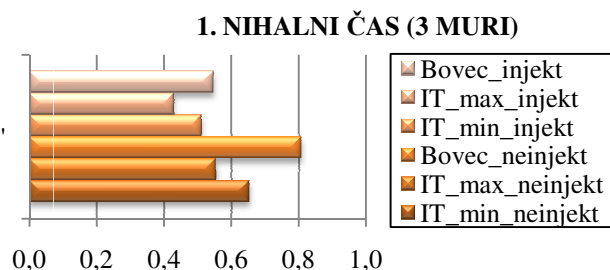
			Dmax [cm]	Du [cm]	q*	Dmax [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s ²]	T* [s]	m*10 ^{^3} [t]	w*10 ^{^3} [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 min	X	+X	2,24	32,14	0,19	1,35	14,32	0,20	32,23	1,61	1,00	1,25	2,85	11,27	1,72	0,137
		+X	1,20	508,7	0,58	0,72	6,301	0,58	11,59	0,86	1,00	1,25	8,90	57,15	30,58	2,434
		-X	2,78	274,3	0,09	1,67	27,42	0,10	32,93	2,23	1,00	1,25	1,43	191,8	15,30	1,218
		-X	2,78	379,2	0,07	1,67	40,94	0,07	46,54	3,32	1,00	1,25	1,48	256,2	9,264	0,737
	Y	+Y	1,71	1,91	2,54	1,02	1,119	2,55	2,51	0,47	0,81	1,25	2,85	0,67	0,97	0,077
		+Y	2,06	1,89	2,63	1,24	0,916	2,64	2,06	0,56	0,81	1,25	2,42	0,78	0,78	0,062
		-Y	1,69	1,81	2,92	1,01	1,027	2,92	2,31	0,46	0,81	1,25	3,13	0,57	0,86	0,068
		-Y	2,01	1,93	3,23	1,21	0,927	3,24	2,08	0,55	0,81	1,25	3,10	0,62	0,65	0,052
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	0,94	232,1	0,39	0,56	7,589	0,40	17,07	0,67	1,00	1,25	97,69	2,37	2,08	0,166
		+X	1,94	236,3	0,30	1,16	9,885	0,30	22,24	1,39	1,00	1,25	36,96	6,39	1,31	0,104
		-X	2,06	279,9	0,15	1,23	19,15	0,16	43,09	1,47	1,00	1,25	21,31	13,1	2,40	0,191
		-X	2,79	333,4	0,06	1,67	46,38	0,06	104,3	3,26	1,00	1,25	7,68	43,4	1,62	0,129
	Y	+Y	1,44	1,91	2,54	1,86	1,180	2,54	2,65	0,39	0,81	1,25	3,39	0,56	1,14	0,091
		+Y	1,75	1,91	2,62	1,05	1,092	2,62	2,45	0,48	0,81	1,25	2,86	0,66	0,92	0,073
		-Y	1,42	1,81	2,85	0,85	1,052	2,85	2,36	0,39	0,81	1,25	3,69	0,49	1,02	0,081
		-Y	1,70	1,83	3,22	1,02	0,929	3,23	2,09	0,47	0,81	1,25	3,47	0,52	0,77	0,061
NEINJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	0,76	336,4	1,29	0,45	2,309	1,30	5,19	0,37	0,92	1,25	579,3	0,58	1,46	0,116
		+X	4,20	1409	0,02	2,52	111,5	0,03	250,9	6,08	0,92	1,25	9,02	156,2	1,53	0,121
		-X	0,79	770,6	0,90	0,47	3,334	0,90	7,50	0,38	0,92	1,25	882,3	0,87	2,11	0,168
		-X	4,20	712,2	0,07	2,52	39,24	0,80	88,29	4,25	0,92	1,25	12,95	54,99	1,10	0,087
	Y	+Y	2,59	2,27	2,04	1,55	0,877	2,04	1,974	0,61	0,79	1,25	1,79	1,26	1,04	0,083
		+Y	3,06	2,24	2,15	1,84	0,731	2,15	1,64	0,73	0,79	1,25	1,57	1,42	0,83	0,066
		-Y	2,57	2,18	2,30	1,54	0,846	2,31	1,90	0,61	0,79	1,25	1,95	1,11	0,93	0,074
		-Y	3,02	2,15	2,50	1,81	0,712	2,51	1,60	0,72	0,79	1,25	1,78	1,20	0,72	0,057

Preglednica 22: Rezultati analize za injektirano stanje zidovine,

Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči (3D model objekta z zvonikom)

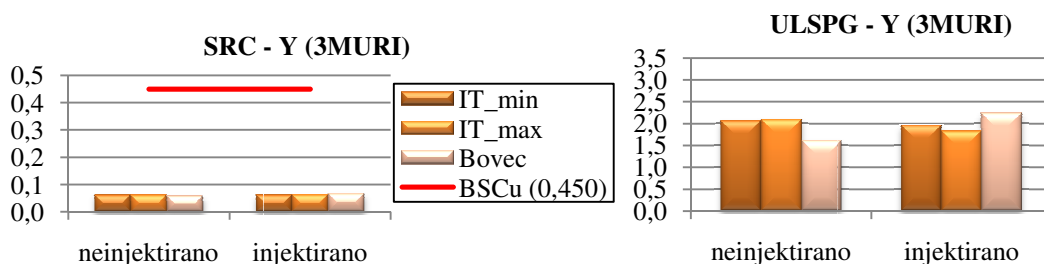
			D _{max} [cm]	D _u [cm]	q*	D _{max} [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s ²]	T* [s]	m*10 ³ [t]	w*10 ³ [t]	dutility	de	H _{id} [MN]	SRC
INJEKTIRANO OPCM 2003 min	X	+X	0,20	234,2	0,58	0,12	5,10	0,59	11,49	0,23	1,01	1,25	701,5	0,33	2,35	0,187
		+X	2,77	257,7	0,07	1,66	38,03	0,08	85,57	3,00	1,01	1,25	7,35	35,07	1,55	0,123
		-X	1,03	253,9	0,29	0,62	10,19	0,29	22,93	0,74	1,01	1,25	72,89	3,48	2,53	0,201
		-X	2,77	310,1	0,08	1,66	36,64	0,08	82,45	2,80	1,01	1,25	9,18	33,78	1,70	0,136
	Y	+Y	1,29	1,80	2,32	0,76	1,29	2,32	2,90	0,37	0,81	1,25	3,38	0,53	1,25	0,100
		+Y	1,59	1,80	2,74	0,96	1,09	2,74	2,46	0,44	0,81	1,25	3,09	0,58	0,96	0,076
		-Y	1,25	1,82	2,65	0,73	1,13	2,65	2,54	0,36	0,81	1,25	4,10	0,44	1,10	0,087
		-Y	1,56	1,95	3,45	0,94	0,86	3,45	1,95	0,43	0,81	1,25	4,31	0,45	0,77	0,062
INJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	2,81	258,2	0,06	1,68	47,41	0,06	106,68	2,28	1,00	1,25	5,82	44,37	3,37	0,268
		+X	2,81	300,6	0,05	1,68	55,58	0,05	125,07	3,08	1,00	1,25	5,78	52,01	2,16	0,172
		-X	1,91	255,9	0,13	1,15	22,19	0,14	49,93	1,36	1,00	1,25	18,07	14,16	3,02	0,240
		-X	2,81	271,4	0,08	1,68	34,85	0,09	78,42	2,52	1,00	1,25	8,32	32,62	2,03	0,162
	Y	+Y	1,01	1,81	1,98	0,56	1,51	1,98	3,40	0,31	0,81	1,25	4,05	0,44	1,46	0,116
		+Y	1,35	1,81	2,53	0,80	1,18	2,53	2,66	0,38	0,81	1,25	3,47	0,52	1,15	0,091
		-Y	1,01	2,55	2,43	0,56	1,23	2,44	2,77	0,30	0,81	1,25	7,26	0,35	1,19	0,095
		-Y	1,29	2,55	3,69	0,76	0,81	3,69	1,82	0,36	0,81	1,25	7,77	0,32	0,79	0,062
INJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	2,94	792,0	0,02	1,76	105,1	0,03	236,62	3,12	0,99	1,25	7,69	102,9	4,14	0,329
		+X	2,94	1979,	0,02	1,76	123,4	0,02	277,81	4,27	0,99	1,25	16,38	120,8	2,60	0,207
		-X	2,94	102,6	0,05	1,76	34,95	0,05	78,65	2,48	0,99	1,25	1,76	58,31	3,72	0,296
		-X	2,94	69,00	0,05	1,76	23,49	0,05	52,87	3,53	0,99	1,25	1,19	57,98	1,82	0,145
	Y	+Y	1,50	2,53	1,89	0,90	1,58	1,89	3,56	0,40	0,81	1,25	3,19	0,793	1,53	0,122
		+Y	1,80	3,63	2,23	1,08	1,34	2,23	3,02	0,49	0,81	1,25	4,49	0,80	1,08	0,086
		-Y	1,44	2,56	2,27	0,86	1,31	2,28	2,96	0,39	0,81	1,25	4,08	0,62	1,29	0,103
		-Y	1,72	2,51	3,02	1,03	0,99	3,02	2,23	0,46	0,81	1,25	4,42	0,56	0,83	0,066

V obliki grafikonov so obdelani le podatki za Y smer potresa, saj so rezultati za X smer potresa nerealni in gre očitno za napako pri računu oz. modeliranju. Zakaj je prišlo do takšnih rezultatov, smo tekom izdelave diplomske naloge povprašali tudi pri izdelovalcih tega programa, ampak na žalost še nismo pridobili odgovora.



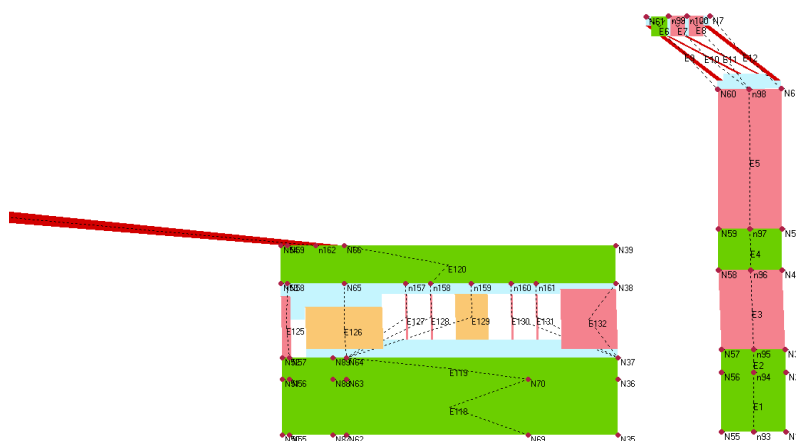
Grafikon 26: Primerjava prvega nihajnega časa, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči
(3D model objekta z zvonikom)

Najdaljši nihajni čas, enako kot v vseh primerih do sedaj, doseže model s podatki iz Bovca za neinjektirano zidovino, medtem ko najkrajši čas doseže model s podatki iz italijanskega standarda za boljšo injektirano zidovino.



Grafikon 27: Primerjava vrednosti SRC-ja in ULSPG-ja za smer Y iz 3Murija,
Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči, (3D model objekta z zvonikom)

Koeficienti potresne odpornosti so zelo majhni in ni velikih razlik med vrednostmi za zid pred injektiranjem in za zid po injektiranju, kar je v neskladu z rezultati na prejšnjih cerkvah. Ravno tako so tudi razlike pri mejnih pospeških tal minimalne, zato sklepamo, da so rezultati vprašljivi.



Slika 83: Prikaz poškodb stene P14 (levo) in stene P1 (desno) po injektiranju; smer X in Y, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči, (3D model objekta z zvonikom)

Iz slik, ki prikazujejo stopnjo poškodovanosti, je razvidno, zakaj rezultati, ki so v preglednicah obarvani sivo, niso verodostojni in grafično prikazani v grafikoni. Pri vseh analizah, ki so bile opravljene na tem modelu, zgornji del zvonika »odnese«, program pa da nerealne rezultate.

11.4.2.2 Model objekta s porezanim zvonikom

Rezultati nelinearne statične analize, ki je bila opravljena na drugem modelu, so zbrani v preglednici 23 in preglednici 24. Vrstice označene z sivo so analize, pri katerih so mejni pomiki D_u veliko večji kot drugje in zato tudi posledično večji ULSPG.

Preglednica 23: Rezultati analize za neinjektirano stanje zidovine,

Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči (3D model objekta s porezanim zvonikom)

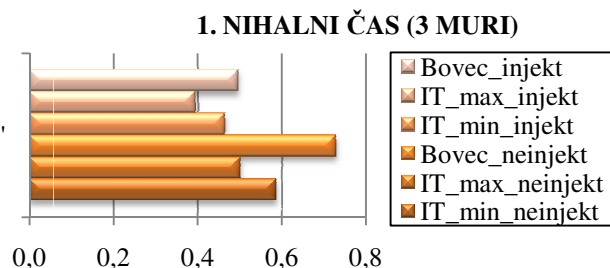
			Dmax [cm]	Du [cm]	q*	Dmax [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s ²]	T* [s]	m*10 ^{^3} [t]	w*10 ^{^3} [t]	duktilnost	de	H _{td} [MN]	SRC
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 min	X	+X	0,48	0,49	1,00	0,29	1,01	1,01	2,27	0,23	0,66	1,27	1,03	0,47	2,19	0,172
		+X	0,76	13,77	1,80	0,39	1,66	1,81	3,73	0,27	0,66	1,27	39,24	0,35	1,22	0,096
		-X	0,49	1,04	1,04	0,29	1,68	1,05	3,78	0,23	0,66	1,27	2,27	0,45	2,11	0,166
		-X	0,72	0,93	1,42	0,38	1,22	1,43	2,75	0,27	0,66	1,27	2,09	0,44	1,55	0,121
	Y	+Y	2,88	2,20	3,94	1,73	0,76	3,95	1,71	0,46	0,67	1,27	3,01	0,73	0,91	0,072
		+Y	3,20	1,69	4,29	1,92	0,52	4,30	1,18	0,51	0,67	1,27	2,27	0,74	0,75	0,059
		-Y	3,04	1,80	3,93	1,82	0,59	3,93	1,33	0,48	0,67	1,27	2,33	0,77	0,86	0,068
		-Y	3,41	1,31	3,90	2,04	0,38	3,91	0,86	0,54	0,67	1,27	1,51	0,86	0,77	0,061
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	0,37	19,57	1,08	0,20	2,77	1,08	6,24	0,20	0,66	1,27	62,05	0,31	2,00	0,157
		+X	0,53	16,36	1,32	0,27	2,27	1,32	5,11	0,23	0,66	1,27	47,77	0,34	1,62	0,127
		-X	0,34	0,53	0,93	0,21	1,31	0,94	2,94	0,20	0,66	1,27	1,44	0,36	2,29	0,180
		-X	0,51	0,86	1,18	0,28	1,45	1,18	3,26	0,23	0,66	1,27	2,21	0,38	1,83	0,144
	Y	+Y	2,50	2,30	3,81	1,50	0,78	3,82	1,76	0,40	0,67	1,27	3,52	0,65	1,07	0,084
		+Y	2,87	1,49	3,78	1,72	0,52	3,78	1,17	0,46	0,67	1,27	1,97	0,75	0,94	0,074
		-Y	2,59	1,88	3,96	1,55	0,72	3,97	1,63	0,41	0,67	1,27	2,89	0,65	0,99	0,078
		-Y	2,99	1,20	3,55	1,79	0,40	3,56	0,90	0,48	0,67	1,27	1,43	0,83	0,96	0,076
NEINJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	1,30	2,02	1,12	0,77	1,49	1,12	3,35	0,35	0,67	1,27	1,77	1,14	2,43	0,191
		+X	1,67	16,71	1,78	1,00	1,68	1,78	3,78	0,40	0,67	1,27	17,90	0,93	1,53	0,120
		-X	1,31	1,63	1,17	0,77	1,21	1,17	3,74	0,35	0,67	1,27	1,48	1,10	2,33	0,183
		-X	1,67	1,71	1,55	1,00	1,02	1,56	2,30	0,40	0,67	1,27	1,60	1,06	1,75	0,138
	Y	+Y	3,81	2,80	3,16	2,28	0,73	3,16	1,65	0,58	0,67	1,27	2,32	1,20	0,94	0,074
		+Y	4,30	2,49	3,42	2,58	0,58	3,43	1,30	0,66	0,67	1,27	1,99	1,25	0,75	0,059
		-Y	3,83	2,77	3,57	2,30	0,72	3,57	1,62	0,59	0,67	1,27	2,58	1,07	0,81	0,064
		-Y	4,31	2,56	3,85	2,59	0,59	3,85	1,33	0,66	0,67	1,27	2,28	1,12	0,67	0,053

Preglednica 24: Rezultati analize za injektirano stanje zidovine,

Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči (3D model objekta s porezanim zvonikom)

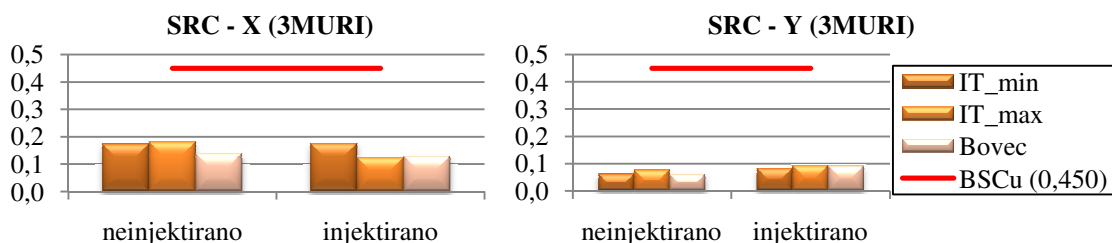
			Dmax [cm]	Du [cm]	q*	Dmax [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s ²]	T* [s]	m*10 ³ [t]	w*10 ³ [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
INJEKTIRANO OPCM 2003 min	X	+X	0,30	21,07	0,94	0,18	3,18	0,94	7,16	0,19	0,67	1,27	65,78	0,32	2,25	0,177
		+X	0,46	0,49	0,29	0,27	1,05	0,96	2,37	0,23	0,67	1,27	1,02	0,48	2,22	0,175
		-X														
		-X	0,43	0,57	0,57	0,24	1,20	1,12	2,70	0,22	0,67	1,27	1,63	0,35	1,89	0,149
	Y	+Y	2,28	2,38	2,38	1,35	0,83	3,61	1,87	0,37	0,67	1,27	3,93	0,60	1,14	0,090
		+Y	2,70	1,21	1,21	1,62	0,44	3,37	1,01	0,43	0,67	1,27	1,51	0,80	1,12	0,088
		-Y	2,38	1,94	1,94	1,42	0,77	3,89	1,73	0,38	0,67	1,27	3,25	0,59	1,05	0,083
		-Y	2,79	1,19	1,19	1,67	0,42	3,53	0,96	0,45	0,67	1,27	1,51	0,78	1,03	0,081
INJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	0,36	24,60	0,97	0,22	3,44	0,87	7,75	0,21	0,67	1,27	58,78	0,41	2,40	0,189
		+X	0,31	22,07	1,14	0,16	2,61	1,15	5,89	0,18	0,67	1,27	94,10	0,23	1,82	0,143
		-X	0,20	20,64	0,99	0,12	3,02	0,99	6,80	0,16	0,67	1,27	101,2	0,20	2,11	0,166
		-X	0,35	18,33	1,33	0,16	2,24	1,34	5,05	0,18	0,67	1,27	75,20	0,20	1,56	0,123
	Y	+Y	1,84	2,24	3,12	1,05	0,96	3,12	2,16	0,32	0,67	1,27	4,40	0,50	1,33	0,104
		+Y	2,29	1,69	3,52	1,36	0,74	3,52	1,66	0,37	0,67	1,27	2,70	0,62	1,16	0,091
		-Y	1,95	1,70	3,38	1,12	0,88	3,38	1,98	0,33	0,67	1,27	3,37	0,50	1,21	0,095
		-Y	2,36	1,10	3,48	1,42	0,46	3,49	1,04	0,39	0,67	1,2720	1,64	0,67	1,17	0,092
INJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	0,44	31,79	0,76	0,26	3,92	0,77	8,82	0,23	0,67	1,27	55,31	0,57	2,87	0,226
		+X	0,49	28,08	1,00	0,30	3,00	1,00	6,74	0,24	0,67	1,27	57,06	0,49	2,20	0,173
		-X	0,37	26,63	1,04	0,22	2,86	1,05	6,44	0,20	0,67	1,27	77,76	0,34	2,11	0,166
		-X	0,56	23,67	1,35	0,29	2,21	1,36	4,97	0,23	0,67	1,27	54,30	0,35	1,63	0,128
	Y	+Y	2,57	3,52	2,90	1,54	1,03	2,91	2,32	0,41	0,67	1,27	3,98	0,88	1,39	0,109
		+Y	2,93	3,75	3,01	1,76	0,99	3,01	2,23	0,41	0,67	1,27	3,86	0,97	1,49	0,117
		-Y	2,79	2,69	2,57	1,67	0,96	2,58	2,16	0,44	0,67	1,27	2,48	1,08	1,44	0,113
		-Y	3,02	2,47	2,99	1,81	0,81	2,99	1,83	0,48	0,67	1,27	2,44	1,01	1,15	0,090

V nadaljevanju so podani enaki grafični prikazi kot za prejšnji model, le da v tem primeru še za X smer potresa.

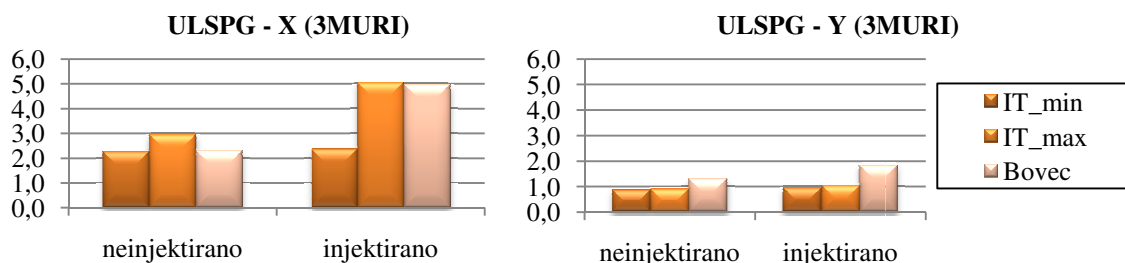


Grafikon 28: Primerjava prvega nihajnega časa, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči (3D model objekta s porezanim zvonikom)

Nihajni čas za model s porezanim zvonikom je skoraj za 0,2 s krajši, kot je bil pri modelu z zvonikom, kar je smiselno, saj odstranjen zvonik poveča celotno togost konstrukcije. Najdaljši nihajni čas doseže model s podatki iz italijanskega standarda za slabšo zidovino pred injektiranjem, kar se je do sedaj v vseh analizah zgodilo prvič.

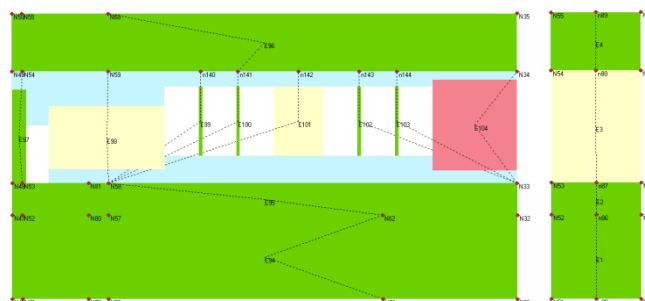


Grafikon 29: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y iz 3Murija, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči (3D model objekta s porezanim zvonikom)

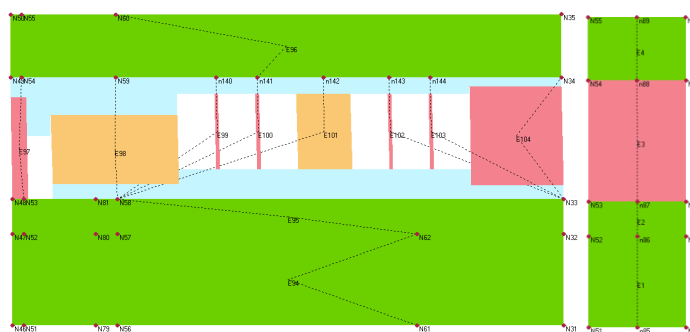


Grafikon 30: Primerjava vrednosti ULSPG-ja za smer X in Y iz 3Murija, Cerkev sv. Antona Puščavnika v Čezsoči (3D model objekta s porezanim zvonikom)

V tem primeru so opazne majhne razlike med SRC koeficienti za zidovino pred injehtiranjem in za zidovino po injehtiranju oziroma so v X smeri rezultati za injehtirana stanja celo slabši od neinjehtirana. Ob pregledu Preglednica 24 in Preglednica 25 je opaziti, da ima model v nekaterih primerih analize nenavadno velik mejni pomik in duktilnost, ti rezultati so v tabeli označeni s sivo barvo. Ker je v teh primerih ULSPG večji zaradi velike duktilnosti, so merodajni primeri za posamezno smer dejansko tisti, ki nimajo najmanjšega koeficienta SRC. Od tod odstopanje oziroma nenavadni rezultati. Lahko pa sklepamo, da rezultati za X smer tudi za model s porezanim zvonikom niso najbolj verodostojni.



Slika 84: Prikaz poškodb stene P14 (levo) in stene P1 (desno) pred injehtiranjem; smer X in Y, Cerkev sv. Antona Pušcavnika v Čezsoči (3D model objekta s porezanim zvonikom)



Slika 85: Prikaz poškodb stene P14 (levo) in stene P1 (desno) po injehtiranju; smer X in Y, Cerkev sv. Antona Pušcavnika v Čezsoči (3D model objekta s porezanim zvonikom)

Vendar pa sliki 84 in sliki 85, ki predstavljata mreži makro-elementov modela pred injetiranjem zidovine in po injektiranju zidovine za obe smeri, nakazujeta, da z modelom lokalno ni nič narobe, saj na mrežah ni opaziti delov, na katerih bi bili pomiki toliko večji kot na primeru modela z zvonikom. Je pa razlog za tako veliko duktilnost oziroma mejne pomike potrebno še raziskati

12 ANALIZA POTRESNE ODPORNOSTI CERKEV SVETE DEVICE MARIJE V POLJU

12.1 Opis

Cerkev svete device Marije v Polju je evidentirana v registru kulturne dediščine pod evidenčno številko enote 3568. Datacija objekta je zadnja polovica 16. stoletja in prva polovica 20. stoletja. Obdobje izgradnje je 16. in 17. stoletje .

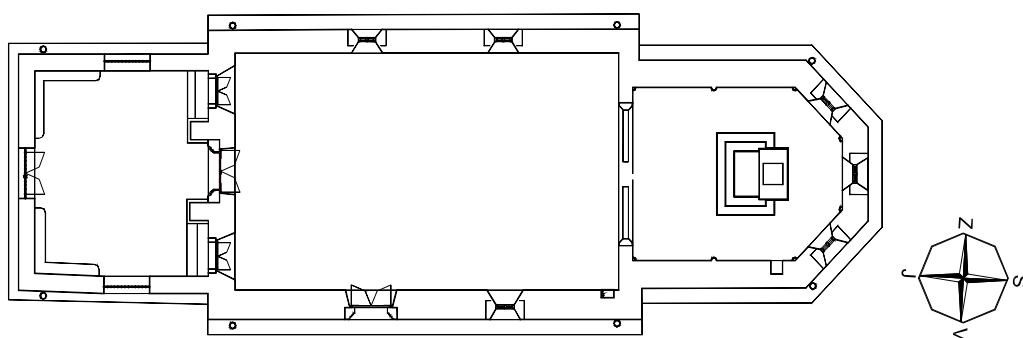


Slika 86: Fotografija Cerkev sv. device Marije v Polju

Zgrajena je bila v 16. stoletju v gotskem slogu z značilno zunanjo podobo; s tipičnimi okni in rebrastim obokom v prezbitoriju. Značilna za gotski slog je tudi preslica. Namesto izgradnje samostojnih zvonikov so v gotiki gradili preslice, ki so služile enakemu namenu kot zvonik. Okna in vrata na vhodni steni v ladjo so lesena z okrasnimi železnimi rešetkami. Gotska okna ladje in prezbitorija so kamnita z barvnimi vitraži. Okroglo okno na vhodni steni ladje pa je kamnito in barvano. Notranjost je v letih 1520 – 1540 poslikal slikar Jernej iz Loke. V prvi svetovni vojni je bila cerkev močno poškodovana in njena zunanja podoba delno spremenjena, v notranjosti pa so se ohranile le freske na levi strani slavloloka.

12.2 Zasnova konstrukcije

Cerkev tvorijo vhodna lopa, ladja in petosminski prezbitერიj. Tlorisne dimenzije ladje so 9,60 x 15,35 m, prezbitერიja 3,5 x 8,90 m in lope 7,85 x 6,75 m. Višina lope oziroma zidu do kapne lege je 3,30, višina ladje je 5,45 m in višina prezbitერიja oziroma gotskega oboka do temena stropa je 7,15 m, celotna višina cerkve do slemenskega roba pa 14,75 m. Bolj natančna celotna geometrija objekta je razvidna iz slik v nadaljevanju.



Slika 87: Tloris pritličja, Cerkev sv. device Marije v Polju

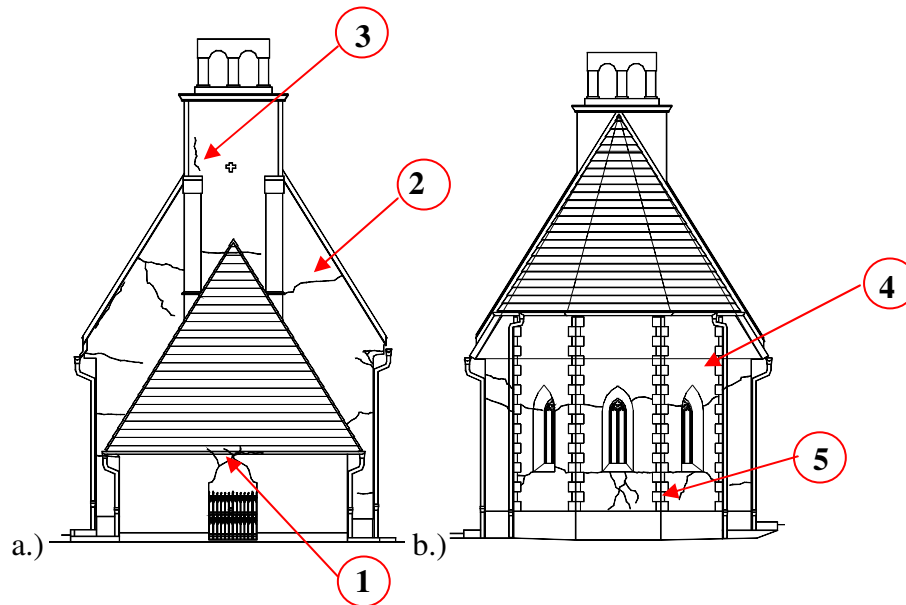
Cerkev ima pasovne kamnite temeljne zidove. Nosilni zidovi so zidani iz kamnitega gradiva.

Debeline kamnitih nosilnih zidov cerkve (ladja in prezbitერიj) v spodnjem delu so od 0,75 do 0,95 m, pri lopi pa okoli 0,55 m. Razporeditev nosilnih zidov po tlorisu objekta je v X smeri bolj ugodna za prevzem potresne obtežbe kot v Y smeri. Nad ladjo je lesen pobarvan strop, medtem ko je nad prezbitერიjem strop v gotskem slogu z rebrastimi oboki.

Ladjo cerkve pokriva leseno dvokapno ostrešje, prekrto z lesenimi škodlami, nakloni strešin so 60°. Nosilni sistem dvokapnice sestavljajo štiri trikotna vešala na medsebojni osni razdalji 3,35 m. Trikotna vešala tvorijo natezni povezniki dimenzij od 0,16 do 0,18 m, poševni oporniki dimenzij od 0,20 do 0,22 m in vertikalni natezni elementi. Streha prezbitერიja se kot dvokapnica zaključuje s tremi ploskvami. Na severni strani ladje je prezbitერიj, ki ga pokriva trinajst kotno leseno ostrešje, prekrto s pločevino. Napušči so ometani, njihova širina je od 0,30 do 0,40 m.

12.3 Analiza poškodb

V nadaljevanju je opisano stanje objekta, ki se sklicuje na kataster razpok, ki je bil narejen za vse štiri fasade.



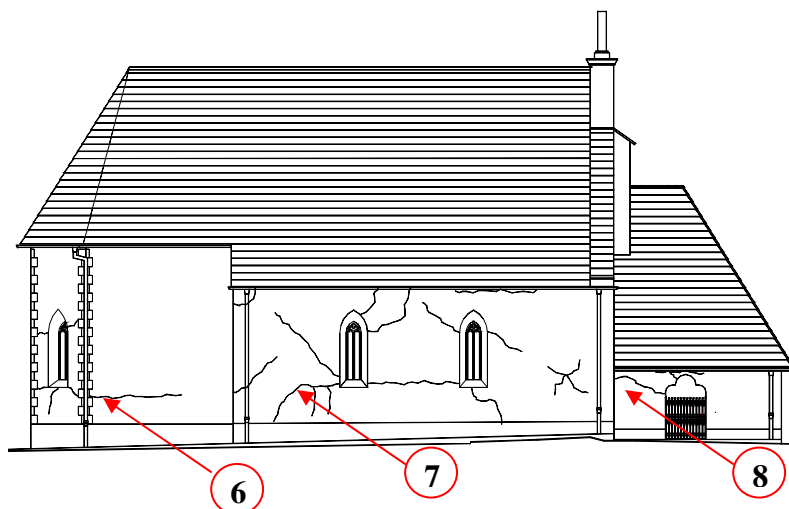
Slika 88: a.) Kataster poškodb – južna fasad, b.) kataster poškodb - severna fasada,
Cerkev sv. device Marije v Polju

Južna fasada

1. Zakristija: diagonalne in navpične razpoke, ki potekajo od odprtine do ostrešja lope. Dolžine razpok od 0,75 do 1,8 m. Mehanizem porušitve: Strižne razpoke v ravni fasade (4.3). Streha sloni na stranskih zidovih in pomanjkanje prečnih zidnih vezi.
2. Ladja: diagonalne in horizontalne razpoke, ki se zaključijo na robu fasade. Dolžina razpok od 0,6 do 2,2 m. Mehanizem porušitve: Sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije (4.25). Pomanjkanje zidnih zvez oziroma zidnih vezi pri stikovanju različnih sklopov.
3. Zvonik na preslico: vertikalna razpoka. Dolžina razpoke 1,1 m. Mehanizem poškodb: Prevrnitev izpostavljenih elementov (zvonik na preslico, koničaste strehe zvonikov, itd.) (4.26). Pomanjkljivo sidranje v osnovno konstrukcije cerkve.

Severna fasada

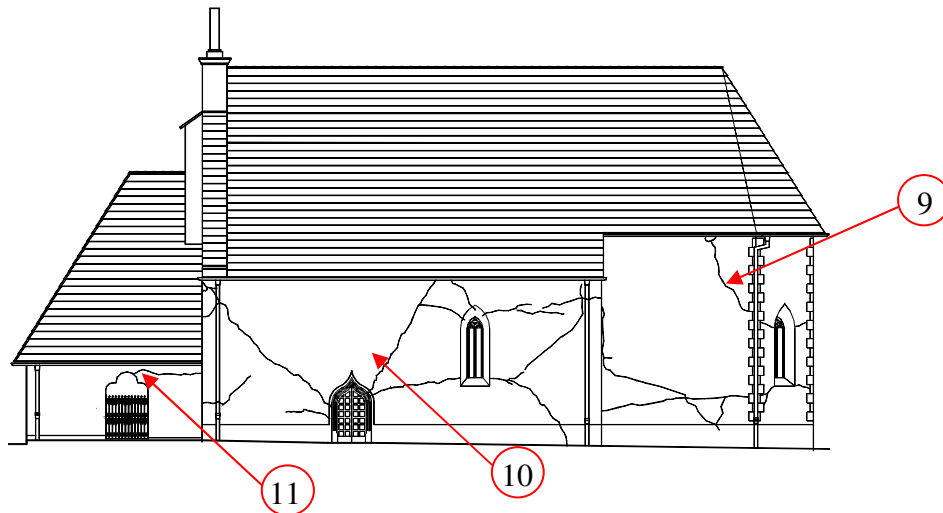
4. Ladja: diagonalne razpoke, ki se zaključijo na stiku z prezbitერიem. Dolžine razpok od 0,8 do 1,25 m. Mehanizem poškodb: Sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije (4.25). Velike razlike v globalni togosti posameznih sklopov.
5. Prezbitერიj: vertikalne in diagonalne razpoke ob okenskih odprtinah. Dolžina razpok od 0,85 do 1,5 m. Mehanizem poškodb: Strižne razpoke prezbitერიja oziroma apside (4.17). Prisotnost velikih odprtín, zidovi relativno tanki podprti na veliki razdalji.



Slika 89: Kataster poškodb - zahodna fasada, Cerkev sv. device Marije v Polju

Zahodna fasada

6. Prezbitერიj: horizontalna razpoka. Dolžina razpoke 3,5 m. Mehanizem poškodb: Strižne razpoke prezbitერიja oziroma apside (4.17). Pomanjkanje zidnih vezi, prerazporeditev strešne obtežbe.
7. Ladja: diagonalne razpoke. Dolžine razpok od 1,1 do 3,4 m. Mehanizem porušitve: Strižne razpoke vzdolžnih zidov (4.6). Poslabšanje nosilnosti zaradi prisotnosti odprtín v zidovih.
8. Lopa: diagonalne in horizontalne razpoke. Dolžina razpok od 1,1 do 2,2 m. Mehanizem porušitve: Sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije (4.25). Pomanjkanje zidnih zvez oziroma zidnih vezi pri stikovanju različnih sklopov.



Slika 90: Kataster poškodb - vzhodna fasada, Cerkev sv. device Marije v Polju

Vzhodna fasada

9. Prezbiterij: diagonalne, vertikalne in horizontalne razpoke. Dolžine razpok od 1,2 do 5,8 m. Mehanizem poškodb: Strižne razpoke prezbiterija oziroma apside (4.17). Pomanjkanje zidnih vezi, prerazporeditev strešne obtežbe.
10. Ladja: diagonalne razpoke. Dolžine razpok od 2,15 do 5,1 m. Mehanizem porušitve: Strižne razpoke vzdolžnih zidov (4.6). Poslabšanje nosilnosti zaradi prisotnosti odprtlin v zidovih.
11. Lopa: horizontalna razpoka. Dolžina razpoke 2,7 m. Mehanizem porušitve: Sodelovanje med posameznimi sklopi konstrukcije (4.25). Pomanjkanje zidnih zvez oziroma zidnih vezi pri stikovanju različnih sklopov.

12.4 Seizmična analiza

Analiza potresne odpornosti zgoraj navedenega sakralnega objekta je bila ponovno narejena z računalniškim programom 3Muri. Narejeni so bili trije modeli. Na prvem modelu je bila narejena analiza postavitve gotskega stropa nad prezbiterijem. Po izbrani zasnovi stropa nad prezbiterijem je bilo na objektu narejenih šest analiz za obe smeri vzburjanja, ki so se med seboj razlikovale glede na materialne karakteristike. Tretji sklop analiz je zajemal analizo potresne odpornosti v primeru izvedbe različnih sanacijskih oziroma ojačitvenih ukrepov.

12.4.1 Modeliranje konstrukcije

12.4.1.1 Etažne višine

Pri modeliranju objekta sta bili uporabljeni dve med seboj različni etažni višini. Bolj podroben potek etažnih višin je razviden iz slike 91.



Slika 91: Etažne višine objekta, Cerkev sv. device Marije v Polju

- Prva etažna višina se zaključí pod okni prezbiterja.
- Druga etažna višina se zaključí na mestu, kjer leseni strop ladje nalega na zunanje zidove. Namen take etažne višine je, da je predel, kjer je pri potresu 2004 nastalo največ razpok, zajet v enem etažnem nivoju.

12.4.1.2 Stropne plošče

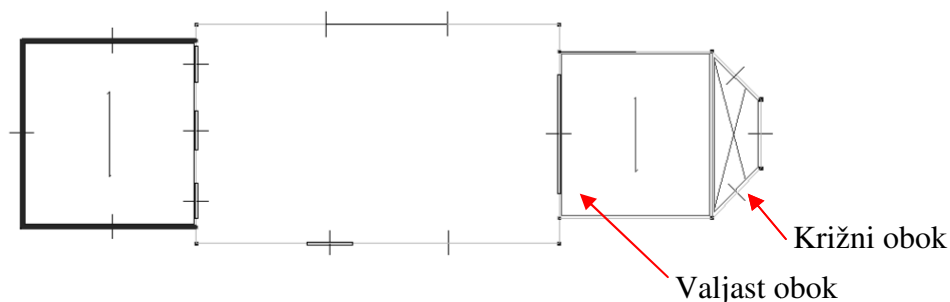
Stropne plošče so bile podane kot plošče nosilne v krajši smeri. Problem pri tem sakralnem objektu je bil, kako oziroma na kateri višini definirati stropno ploščo nad prezbiterijem. Iz tega razloga so bile narejene tri analize na modelu z enakimi materialnimi lastnostmi, pri čemer smo spreminjali stropove nad prezbiterijem.

- Prvi model: postavitve gotskega stropa nad prvo etažno višino, zidovi nad gotskim stropom ostanejo nepovezani.
- Drugi model: postavitve gotskega stropa nad prvo etažno višino, nad drugo etažno višino postavimo leseni strop, ki služi le povezovanju zidov. Njegova obtežba je minimalna.
- Tretji model: postavitve gotskega stropa nad drugo etažno višino

Preglednica 25: Lastna površinska obtežba stropnih plošč, Cerkev sv. device Marije v Polju

Stropna plošča	g (daN/m ²)
lesena nad lopo	23
valjast obok (gotški strop)	84
križni obok (gotški strop)	49
lesena nad prezbitorijem	52
lesena nad ladjo	178

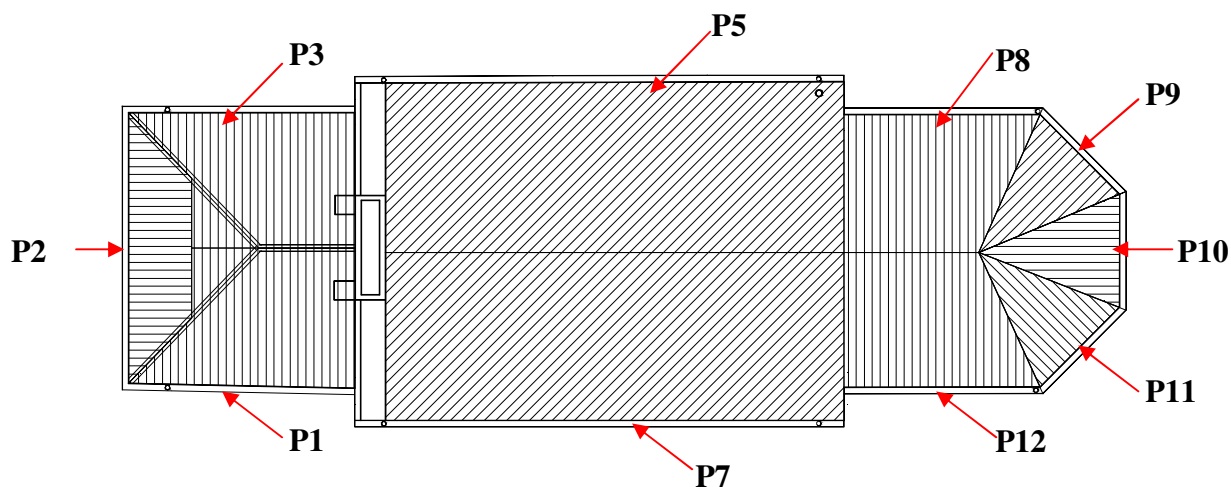
Podajanje gotskega stropa v model nam omogoča program z različnim naborom opečnih oziroma kamnitih obokov. V modelu sta bila uporabljena križni in valjasti obok. Postavitve teh kamnitih obokov je vidna na sliki 92.



Slika 92:Definicija stropov oziroma modeliranje v 3Muriju,
Cerkev sv. device Marije v Polju

12.4.1.3 Strešna konstrukcija

Na sliki 93 je prikazano, kako se lastna teža posamezne strešne konstrukcije prenese na zidove kot linijska obtežba. Poimenovanje zidov je ponovno preneseno iz programa 3Muri. V preglednici 26 so podani zidovi in upoštevana linijska obtežba na posamezne zidove.

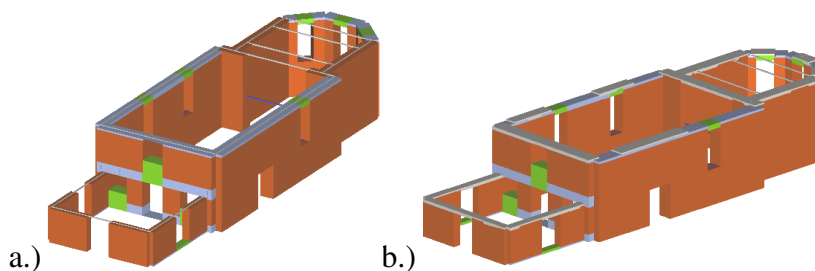


Slika 93: Tloris ostrešja, Cerkev sv. device Marije v Polju

Preglednica 26: Lastna obtežba strešne konstrukcije, Cerkev sv. device Marije v Polju

Zid	P1	P2	P3	P5	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Linijska obtežba(daN/m)	168	168	100	221	221	175	135	135	135	175

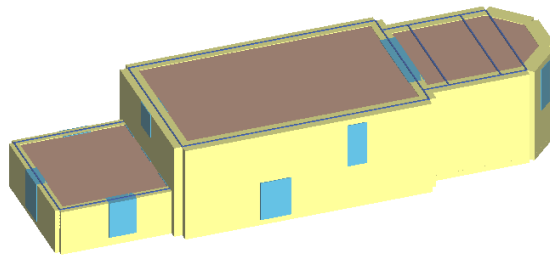
Na sliki 94 sta prikazana 3D modela obravnavanega objekt z različnimi sanacijskimi ukrepi.



Slika 94: a.) 3D modeli – prvi sanacijski ukrep; b.) 3D model – drugi sanacijski ukrep;
Cerkev sv. device Marije v Polju

12.4.2 Prvi sanacijski ukrep

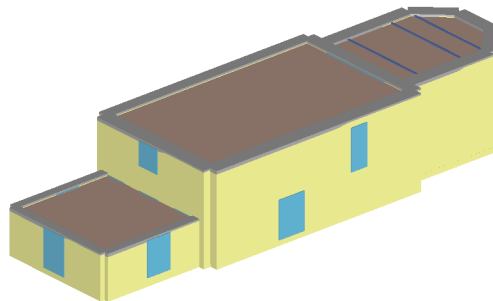
Prvi sanacijski ukrep so povezave zidov z jeklenimi vezmi ter utrditev obokov prezbiterija. Vsaki steni so dodane jeklene vezi, modelirane s palicami premera 20 mm iz jekla S235. Prednapete so s silo 5 kN (500 daN). Razporeditev vezi je prikazana na sliki 95.



Slika 95: Razporeditev jeklenih vezi, označenih z modro barvo,
Cerkev sv. device Marije v Polju

12.4.3 Drugi sanacijski ukrep

Drugi sanacijski ukrep je izvedba armirano betonskega venca na fasadnih zidovih ladje, prezbiterija in lope, pri čemer oboki prezbiterija ostanejo utrjeni. Karakteristike armirano betonskega venca: širina / višina 0,78 / 0,20 m; zgornja armatura $5\Phi 14$, spodnja armatura $2\Phi 10$; zaščitni sloj armature 3cm. Razporeditev armirano betonskih vencev in jeklenih vezi je prikazana na sliki 96.



Slika 96: Razporeditev AB vencev, obarvanih sivo, ter razporeditev jeklenih vezi po
prezbiteriju, obarvanih z modro barvo, Cerkev sv. device Marije v Polju

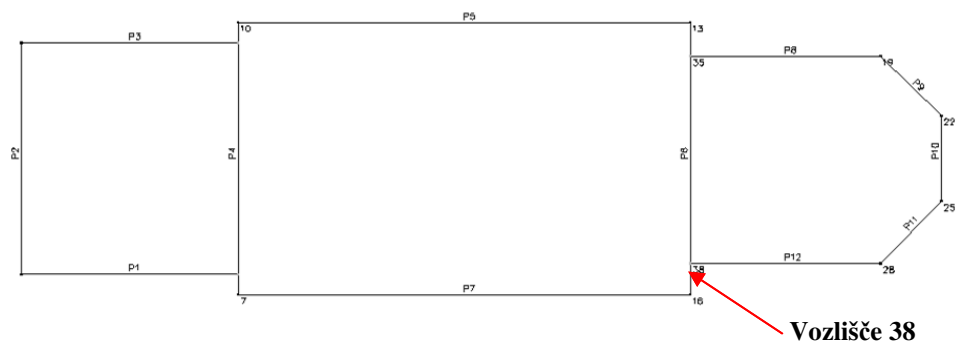
12.4.4 Nelinearna statična analiza

Osnovni računski model obravnavanega objekta oziroma objekt brez ojačitvenih ukrepov je sestavljen iz 48 makro-elementov, ki so razporejeni v dveh etažah. Ti elementi predstavljajo 12 ravninskih zidov, 38 3D vozlišč oziroma 18 2D vozlišč. Razporeditev ravninskih zidov je vidna na sliki 94.

Pri modelih, kjer smo uporabili sanacijske ukrepe, se je zgoraj navedena razporeditev elementov spremenila.

Prvi in drugi model sta sestavljena iz 48 makro-elementov, ki so razporejeni v dveh etažah. V prvem modelu ti elementi predstavljajo 12 ravninskih zidov, 42 3D vozlišč, 16 2D vozlišč in 19 vezi. V drugem primeru pa ti elementi predstavljajo 15 ravninskih ravnin, 42 3D vozlišč, 16 2D vozlišč in 22 vezi.

Za kontrolno točko v vseh modelih je bilo izbrano vozlišče 38. Lega izbrane kontrolne točke je prikazana na sliki 97.



Slika 97: Zaporedna števila vozlišč in ravninskih zidov na tlorisu nadstropja,
Cerkev sv. device Marije v Polju

12.4.5 Rezultati

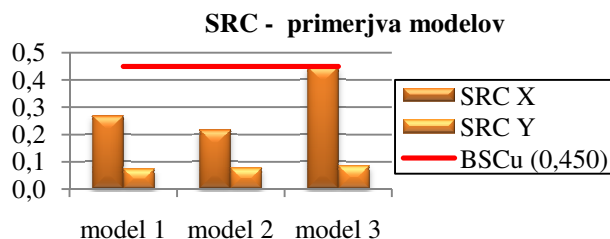
Poglavje rezultati se razdeli na tri podpoglavja. V prvem podpoglavju so zbrani in obdelani rezultati, ki so bili pridobljeni pri analiziranju stropa nad prezbiterijem. V drugem podpoglavju so zbrani in obdelani rezultati šestih analiz za obe smeri vzbujaanja, ki se med seboj razlikujejo glede na materialne lastnosti zidovine. V tretjem podpoglavju pa je bila narejena analiza potresne odpornosti objektov v primerih, ko so bili uporabljeni ojačitveni ukrepi.

12.4.5.1 Modeli različnih stropih konstrukcij nad prezbitერიem

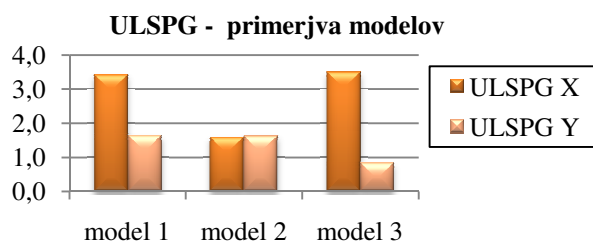
Rezultati nelinearne statične analize, ki je bila opravljena na treh različnih modelih z enakimi materialnimi lastnostmi, so zbrani v preglednici 27. Uporabljene materialne lastnosti so podatki iz Bovca za injektirano zidovino.

Preglednica 27: Rezultati nelinearne statične analize za tri različne računske modele z enakimi materialnimi karakteristikami, Cerkev sv. device Marije v Polju

			Dmax [cm]	Du [cm]	q*ULS	Dmax [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s2]	T* [s]	m*10^3 [t]	w*10^3 [t]	dutlity	de	H _{id} [MN]	SRC
1. MODEL Gotski strop 1. etažna višina	X	+X	0,07	2,32	0,91	0,04	3,27	0,92	7,35	0,10	0,64	0,91	28,58	0,08	2,07	0,225
		+X	0,14	2,32	1,22	0,06	2,45	1,22	5,52	0,11	0,64	0,91	30,39	0,07	1,60	0,174
		-X	0,08	0,24	0,63	0,05	1,98	0,63	4,27	0,10	0,64	0,91	2,02	0,11	2,97	0,322
		-X	0,09	0,20	0,80	0,05	1,51	0,80	3,41	0,10	0,64	0,91	1,81	0,11	2,46	0,267
	Y	+Y	1,84	2,83	2,91	1,00	1,03	2,91	2,32	0,25	0,34	0,91	6,07	0,46	0,94	0,103
		+Y	2,04	2,67	3,70	1,15	0,81	3,70	1,82	0,27	0,34	0,91	6,43	0,41	0,74	0,080
		-Y	1,91	2,41	3,24	1,06	0,92	3,24	2,08	0,26	0,34	0,91	5,53	0,43	0,85	0,092
		-Y	2,09	2,25	4,11	1,19	0,72	4,11	1,64	0,28	0,34	0,91	5,84	0,38	0,67	0,072
2. MODEL Gotski strop 1.etažna višina + lesen strop	X	+X	0,13	0,28	0,66	0,08	1,67	0,67	3,75	0,09	0,49	0,91	1,47	0,19	4,10	0,445
		+X	0,15	0,28	0,81	0,09	1,37	0,82	3,10	0,10	0,49	0,91	1,49	0,18	3,44	0,374
		-X	0,13	0,16	0,90	0,08	1,12	0,91	2,53	0,09	0,49	0,91	1,08	0,14	3,06	0,332
		-X	0,30	0,12	1,45	0,09	0,70	1,46	1,59	0,10	0,49	0,91	1,11	0,10	1,98	0,215
	Y	+Y	1,93	3,55	3,00	1,06	1,00	3,00	2,25	0,26	0,35	0,91	7,35	0,48	0,95	0,104
		+Y	2,13	3,43	3,59	1,21	0,83	3,59	1,87	0,28	0,35	0,91	7,47	0,45	0,80	0,086
		-Y	1,96	3,41	3,35	1,09	0,89	3,36	2,01	0,26	0,35	0,91	7,86	0,43	0,86	0,093
		-Y	2,25	2,85	4,14	1,29	0,72	4,15	1,62	0,29	0,35	0,91	6,67	0,42	0,69	0,075
3. MODEL Gotski strop 2. etažna višina	X	+X	0,12	0,24	0,64	0,07	1,67	0,64	3,76	0,09	0,53	0,91	1,30	0,18	4,10	0,446
		+X	0,14	0,24	0,66	0,09	1,55	0,66	3,49	0,10	0,53	0,91	1,11	0,21	4,10	0,446
		-X	0,12	1,24	0,76	0,07	3,47	0,77	7,81	0,09	0,53	0,91	7,72	0,16	3,43	0,373
		-X	0,15	1,20	1,01	0,09	2,87	1,02	6,46	0,10	0,53	0,91	8,22	0,14	2,72	0,295
	Y	+Y	1,85	0,88	2,80	1,01	0,53	2,81	1,21	0,26	0,34	0,91	1,78	0,49	0,99	0,108
		+Y	2,05	0,64	3,58	1,15	0,37	3,59	0,83	0,27	0,34	0,91	1,47	0,43	0,77	0,084
		-Y	1,92	1,00	3,27	1,06	0,57	3,27	1,28	0,26	0,34	0,91	2,32	0,43	0,84	0,092
		-Y	2,11	0,92	4,04	1,20	0,47	4,04	1,07	0,28	0,34	0,91	2,33	0,39	0,68	0,074



Grafikon 31: Primerjava SRC-jev glede na izvedbo stropa nad prezbitერიjem,
Cerkev sv. device Marije v Polju



Grafikon 32: Primerjava ULSPG-jev glede na izvedbo stropa nad prezbitერიjem,
Cerkev sv. device Marije v Polju

Pri grafičnem prikazu SRC koeficientov se lepo vidi, da zasnova stropne konstrukcije na modelu močno vpliva na potresno odpornost samega objekta. Pri tretjem modelu smo dosegli največjo potresno odpornost v smislu SRC, vendar pa najmanjši mejni pospešek ULSPG v Y smeri, ki je ponovno bolj kritična smer. Iz slednjega razloga smo v nadaljevanju uporabljali takšno zasnovo stropa.

Pri primerjavi SRC-jev smo ugotovili, da je SRC v X smeri za prvi model 40 % nižji od izbranega modela, SRC za drugi model pa 48 %. Potresne odpornosti v Y smeri so zelo majhne zaradi same razporeditve nosilnih zidov.

12.4.5.2 Variirane materialne karakteristike

Preglednica 28: Rezultati analize za neinjektirano stanje zidovine,

Cerkev sv. device Marije v Polju

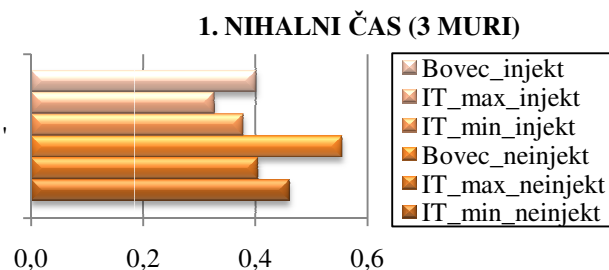
			Dmax [cm]	Du [cm]	q*	Dmax [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s2]	T* [s]	m*10 ³ [t]	w*10 ³ [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 min	X	+X	0,17	1,04	0,89	0,10	2,50	0,89	5,64	0,11	0,52	0,91	5,43	0,19	3,15	0,343
		+X	0,26	0,40	1,11	0,12	1,20	1,12	2,71	0,12	0,52	0,91	2,15	0,18	2,62	0,285
		-X	0,22	0,36	1,13	0,10	1,22	1,13	2,76	0,11	0,52	0,91	2,39	0,15	2,48	0,270
		-X	0,35	0,20	1,41	0,12	0,78	1,41	1,76	0,12	0,52	0,91	1,35	0,14	2,09	0,227
	Y	+Y	2,35	1,52	3,39	1,35	0,66	3,40	1,50	0,31	0,34	0,91	2,63	0,57	0,81	0,089
		+Y	2,56	1,36	4,38	1,49	0,54	4,39	1,23	0,33	0,34	0,91	2,71	0,50	0,63	0,068
		-Y	2,54	1,36	3,78	1,48	0,55	3,78	1,25	0,33	0,34	0,91	2,34	0,58	0,73	0,079
		-Y	2,79	1,32	4,67	1,65	0,48	4,67	1,09	0,35	0,34	0,91	2,44	0,54	0,59	0,064
NEINJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	0,11	0,92	0,68	0,07	3,09	0,68	6,96	0,09	0,53	0,91	5,66	0,16	3,77	0,410
		+X	0,13	0,20	0,84	0,08	1,26	0,84	2,85	0,10	0,53	0,91	1,26	0,15	3,13	0,341
		-X	0,11	0,16	0,91	0,07	1,17	0,92	2,63	0,09	0,53	0,91	1,31	0,12	2,77	0,302
		-X	0,14	1,04	0,99	0,08	2,70	0,99	6,08	0,10	0,53	0,91	7,48	0,13	2,69	0,293
	Y	+Y	1,86	0,96	2,83	1,01	0,57	2,84	1,29	0,26	0,34	0,91	1,96	0,49	0,96	0,105
		+Y	2,07	0,72	3,61	1,17	0,40	3,61	0,90	0,27	0,34	0,91	1,65	0,43	0,76	0,082
		-Y	1,99	0,92	3,20	1,11	0,51	3,21	1,16	0,27	0,34	0,91	1,96	0,46	0,84	0,092
		-Y	2,18	0,96	4,17	1,25	0,47	4,17	1,07	0,29	0,34	0,91	2,37	0,40	0,65	0,071
NEINJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	0,61	0,80	1,02	0,35	1,15	1,03	2,59	0,18	0,51	0,91	1,40	0,57	3,47	0,378
		+X														
		-X	0,79	0,52	1,40	0,35	0,78	1,41	1,77	0,18	0,51	0,91	1,24	0,41	2,55	0,277
		-X	0,98	0,48	1,77	0,43	0,63	1,78	1,42	0,19	0,51	0,91	1,25	0,38	2,01	0,219
	Y	+Y	3,37	1,64	3,61	2,02	0,48	3,61	1,09	0,40	0,38	0,91	1,76	0,93	0,84	0,091
		+Y	3,59	1,56	4,20	2,15	0,43	4,21	0,97	0,43	0,38	0,91	1,82	0,85	0,68	0,074
		-Y	3,39	1,64	3,95	2,03	0,48	3,95	1,09	0,41	0,38	0,91	1,92	0,85	0,75	0,082
		-Y	3,62	1,52	4,64	2,17	0,42	4,65	0,94	0,43	0,38	0,91	1,96	0,77	0,60	0,065

Preglednica 29: Rezultati analize za injektirano stanje zidovine,

Cerkev sv. device Marije v Polju

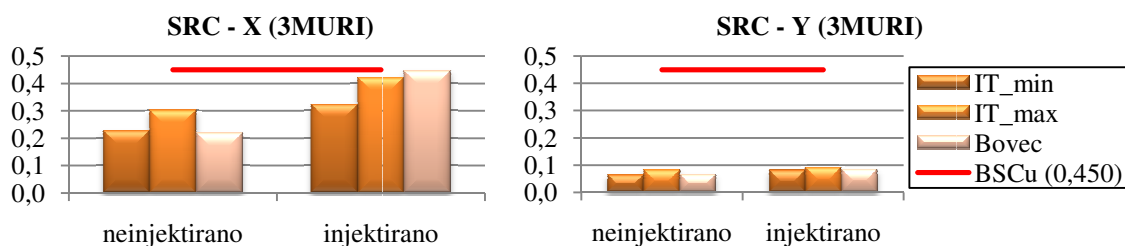
			Dmax [cm]	Du [cm]	q*	Dmax [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s2]	T* [s]	m*10 ³ [t]	w*10 ³ [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
INJEKTIRANO OPCM 2003 min	X	+X	0,09	0,36	0,62	0,05	2,15	0,62	4,85	0,08	0,53	0,91	2,55	0,14	3,94	0,429
		+X	0,11	0,20	0,85	0,06	1,34	0,85	3,02	0,09	0,53	0,91	1,61	0,12	2,97	0,323
		-X	0,09	1,08	0,78	0,05	3,65	0,79	8,21	0,08	0,53	0,91	9,55	0,11	3,09	0,336
		-X	0,11	1,68	0,95	0,07	3,15	0,95	7,09	0,09	0,53	0,91	14,53	0,11	2,65	0,288
	Y	+Y	1,66	0,80	2,67	0,88	0,55	2,67	1,255	0,24	0,34	0,91	1,81	0,44	1,01	0,110
		+Y	1,87	0,84	3,76	1,04	0,50	3,76	1,127	0,25	0,34	0,91	2,38	0,35	0,72	0,079
		-Y	1,77	0,68	2,92	0,96	0,46	2,92	1,04	0,25	0,34	0,91	1,57	0,43	0,92	0,100
		-Y	1,95	0,60	3,65	1,09	0,37	3,66	0,83	0,26	0,34	0,91	1,53	0,39	0,74	0,080
INJEKTIRANO OPCM 2003 max	X	+X	0,06	0,20	0,49	0,03	2,31	0,49	5,20	0,07	0,54	0,91	1,71	0,11	4,49	0,488
		+X	0,07	0,20	0,59	0,04	1,93	0,59	4,34	0,08	0,54	0,91	1,740	0,11	3,88	0,421
		-X	0,06	2,20	0,64	0,04	4,67	0,64	10,51	0,07	0,54	0,91	23,85	0,09	3,45	0,375
		-X	0,07	2,20	0,84	0,04	3,55	0,83	7,99	0,08	0,54	0,91	26,24	0,08	2,76	0,300
	Y	+Y	1,33	0,52	2,52	0,67	0,50	2,52	1,14	0,20	0,33	0,91	1,55	0,33	1,06	0,116
		+Y	1,50	0,40	3,18	0,80	0,37	3,19	0,83	0,21	0,33	0,91	1,34	0,29	0,84	0,092
		-Y	1,40	0,52	2,83	0,73	0,47	2,83	1,07	0,20	0,33	0,91	1,67	0,31	0,95	0,103
		-Y	1,57	0,44	3,41	0,85	0,37	3,42	0,84	0,22	0,33	0,919	1,5	0,29	0,78	0,085
INJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	0,12	0,24	0,64	0,07	1,67	0,64	3,76	0,09	0,53	0,91	1,3	0,18	4,10	0,446
		+X	0,14	0,24	0,66	0,09	1,55	0,66	3,49	0,10	0,53	0,91	1,11	0,21	4,10	0,446
		-X	0,12	1,24	0,76	0,07	3,47	0,77	7,81	0,09	0,53	0,91	7,72	0,16	3,43	0,373
		-X	0,15	1,20	1,01	0,09	2,87	1,02	6,46	0,10	0,53	0,91	8,22	0,14	2,72	0,295
	Y	+Y	1,85	0,88	2,80	1,01	0,53	2,81	1,21	0,26	0,34	0,91	1,78	0,49	0,99	0,108
		+Y	2,05	0,64	3,58	1,15	0,37	3,59	0,83	0,27	0,34	0,91	1,47	0,43	0,77	0,084
		-Y	1,92	1,00	3,27	1,06	0,57	3,27	1,28	0,26	0,34	0,91	2,32	0,43	0,84	0,092
		-Y	2,11	0,92	4,04	1,20	0,47	4,04	1,07	0,28	0,34	0,91	2,33	0,39	0,68	0,074

Nihajni čas konstrukcije, SRC in ULSPG so v nadaljevanju tudi tu prikazani v obliki grafikonov. Uporabljeni podatki so rumeno obarvana polja v Preglednica 28 in Preglednica 29, vendar pa naj tu omenimo, da so mejni pospeški za različne analize v posamezni smeri precej različni, kar je posledica različnih kombinacij nosilnosti in mejnih pomikov. Za merodajne primere, izbrane glede na ULSPG, ne velja nujno, da imajo med vsemi primeri tudi najmanjše SRC koeficiente.



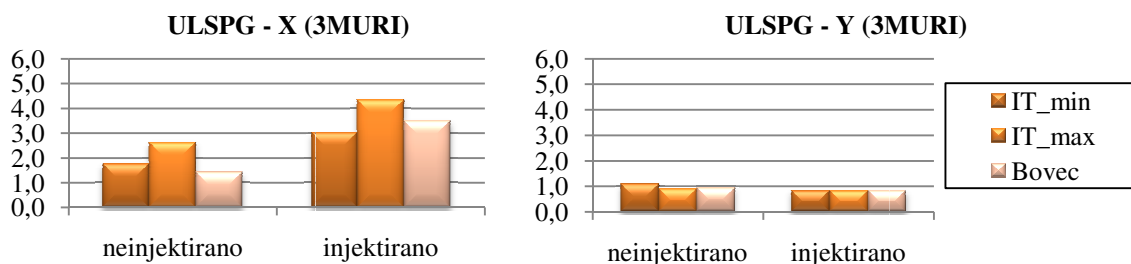
Grafikon 33: Primerjava prvega nihalnega časa, Cerkev sv. device Marije v Polju (variantne materialne karakteristike)

Nihajni časi konstrukcije, ki smo jih pridobili za ta model cerkve so najkrajši do sedaj. Njihova dolžina je pogojena z višino konstrukcije, najnižja do sedaj. Najdaljši in najkrajši nihajni čas smo pridobili z enakimi podatki, kot do sedaj skoraj pri vseh analiziranih objektih.



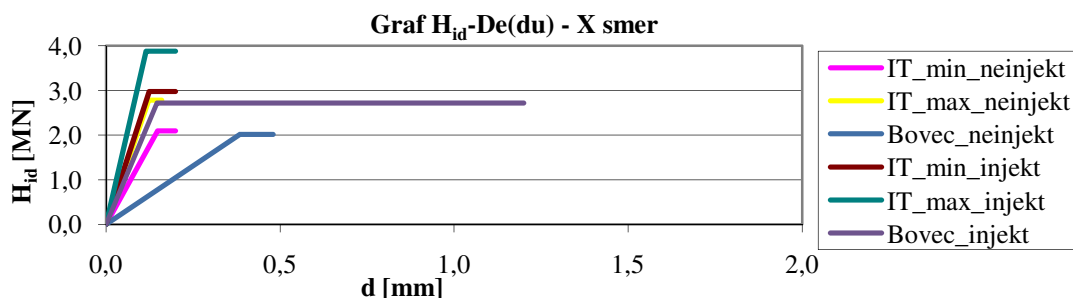
Grafikon 34: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y iz 3Muri, Cerkev sv. device Marije v Polju (variantne materialne karakteristike)

Vrednosti SRC so v tem primeru zelo velike, saj modeli z injektiranimi zidovi v X smeri skoraj dosegajo zahtevano potresno odpornost BSC_u v skladu z zahtevami standarda EC8 (rdeča črta na grafikonih). Potresna odpornost v Y smeri je zelo majhna, zato smo se v nadaljevanju odločali za različne sanacijske ukrepe.

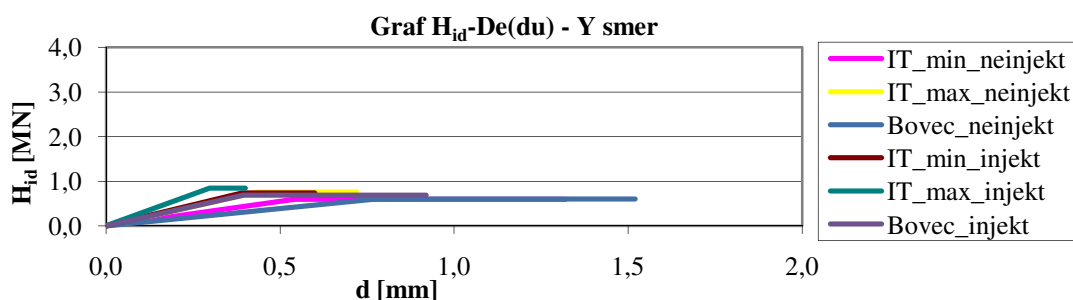


Grafikon 35: Primerjava vrednosti ULSPG-ja za smer X in Y iz 3Murija, Cerkev sv. device Marije v Polju (spreminjane materialne karakteristike)

Pospešek tal je glede na preostale analizirane objekte dokaj majhen. Občutna je tudi razlika med pospeškom tal v X in Y smeri, kar se vidi iz zgornjih grafikonov.



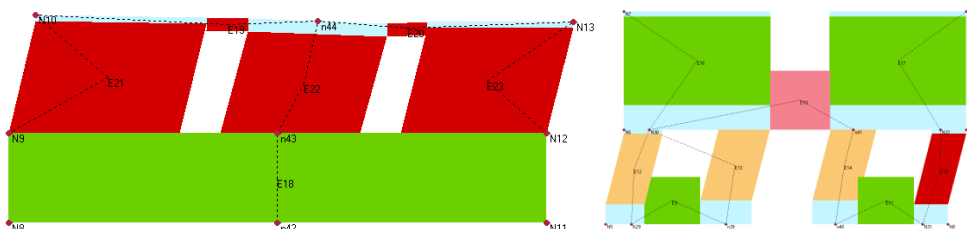
Grafikon 36: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize - smer X, Cerkev sv. device Marije v Polju (spreminjane materialne karakteristike)



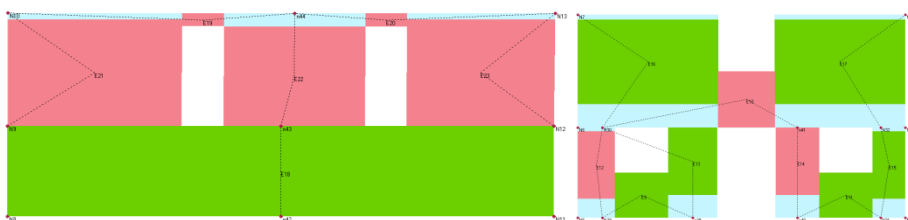
Grafikon 37: Idealizirane histerezne ovojnice, merodajne za posamezne primere analize - smer Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (spreminjane materialne karakteristike)

Iz zgornjih grafikonov je razvidno, da je togost konstrukcije v Y smeri razmeroma majhna, saj so nakloni premic majhni. V X smeri pa je zgodba drugačna, saj imamo opravka z velikimi nakloni premic. Vzrok za majhno togost v Y smeri je gotovo majhno število nosilnih zidov v Y smeri. Z injektiranjem zidov, kot je razvidno iz grafikonov, se povečuje nosilnost in zmanjšujejo končni pomiki.

Na spodnjih slikah je prikazana poškodovanost objekta v primeru neinjektiranih in injektiranih zidov, pri čemer so uporabljene materialne lastnosti iz Bovca.



Slika 98: Prikaz poškodb stene P5 (levo) in stene P4 (desno) pred injektiranjem; smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (Variantne materialne karakteristike)



Slika 99: Prikaz poškodb stene P5 (levo) in stene P4 (desno) po injektiranju; smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (Variantne materialne karakteristike)

Stopnja poškodovanosti, ki jo razberemo iz zgornje slike za neinjektirano stanje (slika 98), se ujema s katastrom poškodb. Zgornje mreže makro – elementov prikazujejo, da se v X smeri pojavljajo upogibne porušitve v primeru neinjektiranega stanja in upogibne poškodbe v primeru injektiranega. V Y smeri pa za prikazano steno v neinjektiranem stanju pride do strižnih poškodb in porušitve slopov med odprtini, po injektiranju pa so ti slopovi nepoškodovani ali upogibno poškodovani.

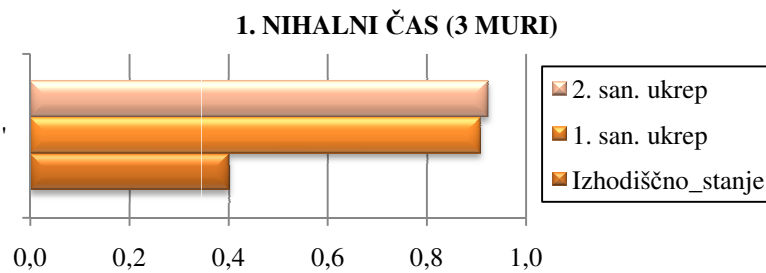
12.4.5.3 Sanacijski ukrepi

Preglednica 30: Rezultati analize za modele, na katerih so uporabljeni sanacijski ukrepi,

Cerkev sv. device Marije v Polju

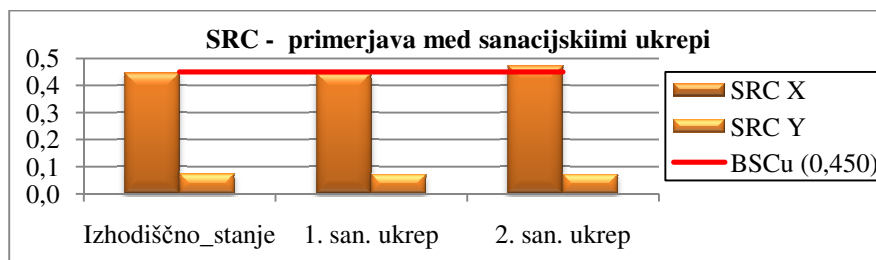
			Dmax [cm]	Du [cm]	q*	Dmax [cm]	Alpha u	q*	ULSPG [m/s2]	T* [s]	m*10^3 [t]	w*10^3 [t]	duktilnost	de	H _{id} [MN]	SRC
INJEKTIRANO Tehnična pisarna Bovec	X	+X	0,12	0,24	0,64	0,07	1,67	0,64	3,76	0,09	0,53	0,91	1,30	0,18	4,10	0,446
		+X	0,14	0,24	0,66	0,09	1,55	0,66	3,497	0,10	0,53	0,91	1,11	0,21	4,10	0,446
		-X	0,12	1,24	0,76	0,07	3,47	0,77	7,81	0,09	0,53	0,91	7,72	0,16	3,43	0,730
		-X	0,15	1,20	1,01	0,09	2,87	1,02	6,467	0,10	0,53	0,91	8,22	0,14	2,72	0,295
	Y	+Y	1,85	0,88	2,80	1,01	0,53	2,81	1,212	0,26	0,34	0,91	1,78	0,49	0,99	0,108
		+Y	2,05	0,64	3,58	1,15	0,37	3,59	0,833	0,27	0,34	0,91	1,47	0,43	0,77	0,084
		-Y	1,92	1,00	3,27	1,06	0,57	3,27	1,287	0,26	0,34	0,91	2,32	0,43	0,84	0,092
		-Y	2,11	0,92	4,04	1,20	0,47	4,04	1,076	0,28	0,34	0,91	2,33	0,39	0,68	0,074
INJEKTIRANO Prvi sanacijski ukrep	X	+X	0,13	0,28	0,52	0,08	1,98	0,52	4,455	0,09	0,52	0,91	1,14	0,24	5,19	0,564
		+X	0,15	0,28	0,67	0,09	1,59	0,67	3,577	0,10	0,52	0,91	1,26	0,22	4,09	0,445
		-X	0,12	0,80	0,76	0,07	2,59	0,76	5,835	0,09	0,52	0,91	5,01	0,16	3,51	0,382
		-X	0,15	1,08	1,01	0,09	2,65	1,01	5,963	0,10	0,52	0,91	7,42	0,14	2,73	0,973
	Y	+Y	0,45	1,04	1,00	0,27	2,20	1,00	4,949	0,36	0,68	0,91	2,31	0,45	0,89	0,097
		+Y	0,51	0,96	1,37	0,30	1,86	1,37	4,197	0,39	0,68	0,91	2,59	0,37	0,65	0,071
		-Y	0,49	1,00	1,03	0,29	2,00	1,03	4,511	0,38	0,68	0,91	2,11	0,47	0,87	0,094
		-Y	0,54	1,20	1,31	0,32	2,22	1,32	4,997	0,40	0,68	0,91	2,93	0,41	0,66	0,072
INJEKTIRANO Drugi sanacijski ukrep	X	+X	0,13	0,28	0,58	0,08	1,82	0,58	4,099	0,09	0,52	0,98	1,23	0,22	4,95	0,503
		+X	0,16	0,28	0,64	0,09	1,62	0,64	3,651	0,10	0,52	0,98	1,16	0,24	4,66	0,473
		-X	0,13	0,68	0,75	0,08	2,29	0,76	5,165	0,09	0,52	0,98	4,08	0,16	3,78	0,383
		-X	0,15	0,52	0,90	0,09	1,70	0,91	3,832	0,10	0,52	0,98	3,11	0,16	3,29	0,334
	Y	+Y	0,46	2,76	0,96	0,27	3,10	0,97	6,983	0,37	0,72	0,98	5,83	0,47	0,96	0,097
		+Y	0,52	2,60	1,22	0,31	2,45	1,22	5,531	0,39	0,72	0,98	6,11	0,42	0,76	0,077
		-Y	0,47	2,56	1,17	0,28	2,54	1,18	5,734	0,37	0,72	0,98	6,45	0,39	0,78	0,080
		-Y	0,52	2,52	1,49	0,31	2,01	1,49	4,531	0,40	0,72	0,98	7,19	0,35	0,61	0,062

Zaradi primerjav med posameznimi sanacijskimi ukrepi so rezultati analiz prikazani v obliki grafikonov. Posamezni sanacijski ukrepi so detaljno opisani pod poglavjem Seizmična analiza. Materialne lastnosti zidovine pri vseh sanacijskih ukrepih so enake. Uporabljena je injektirana zidovina iz Bovca.



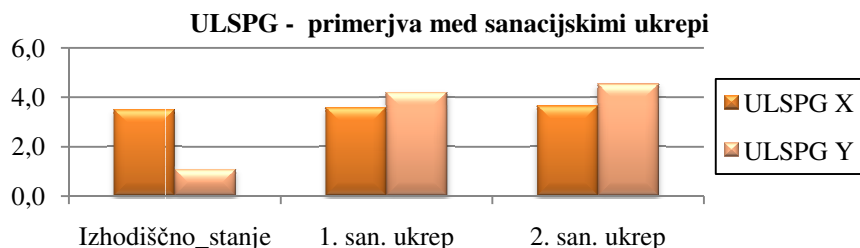
Grafikon 38: Primerjava prvih nihajnih časov, Cerkev sv. device Marije v Polju (sanacijski ukrepi)

Nihajni časi pri sanacijskih ukrepih se povečajo za več kot polovico. To je sicer v nasprotju s pričakovanim, saj bi se moral nihajni čas s povečanjem togosti konstrukcije zmanjšati. Sklepamo lahko, da je prišlo do spremenjenega obnašanja modela.



Grafikon 39: Primerjava vrednosti SRC za smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (sanacijski ukrepi)

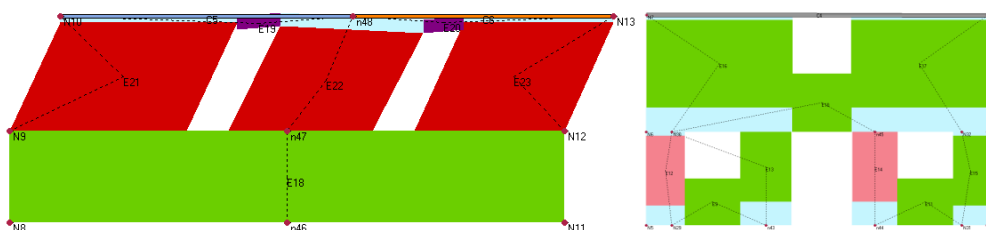
Vzrok za sanacijske ukrepe je bila majhna potresna odpornost v Y smeri, ki je, kljub sanacijskim ukrepom, v smislu SRC še vedno premajhna, kar je vidno iz zgornjega grafikona. Potresna odpornost v X smeri pa se je s sanacijskimi ukrepi zelo povečala in je skoraj v vseh treh modelih dosegla predpisano potresno odpornost po EC8.



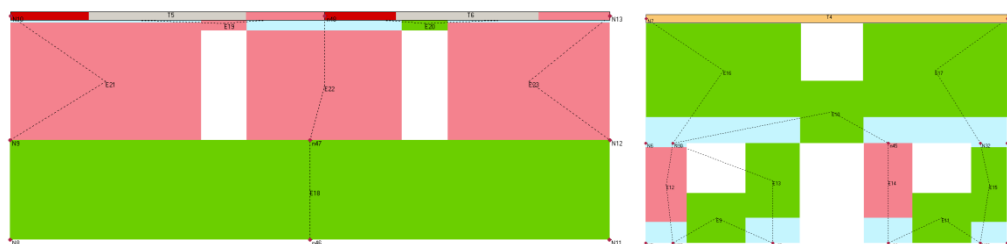
Grafikon 40: Primerjava vrednosti ULSPG-ja za smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (sanacijski ukrepi)

Mejni pospešek tal v Y smeri se je s sanacijskimi ukrepi zelo povečal, medtem ko je v X smeri ostal skoraj nespremenjen. Vrednosti mejnega pospeška tal so tako v Y smeri pri obeh sanacijskih ukrepih presegle projektni pospešek tal.

Stopnjo poškodovanosti stene P1 pri delovanju potresa v X smeri in stene P2 pri delovanju potresa v Y lahko opazimo na sliki 100 (prvi sanacijski ukrep) in sliki 101 (drugi sanacijski ukrep).



Slika 100: Prikaz poškodb stene P5 (levo) in stene P4 (desno) po injektiranju in izvedbi prvega sanacijskega ukrepa; smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (sanacijski ukrepi)



Slika 101: Prikaz poškodb stene P5 (levo) in stene P4 (desno) po injektiranju in izvedbi drugega sanacijskega ukrepa; smer X in Y, Cerkev sv. device Marije v Polju (sanacijski ukrepi)

13 KOMENTAR REZULTATOV SEIZMIČNIH ANALIZ

S programom 3Muri smo za štiri cerkve analizirali prve nihajne čase, koeficient potresne odpornosti SRC ter mejne pospeške tal, primerjali idealizirane histerezne ovojnice in stopnjo poškodb glede na različne kombinacije materialne lastnosti. Pri dveh cerkvah je bila narejena tudi primerjalna analiza rezultatov dobljenih s programoma Sremb in 3Muri.

Pri analiziranju prvih nihajnih časov so opazne velike razlike glede na to ali so bile uporabljene materialne lastnosti za neinjektirano ali za injektirano zidovino. Z uporabo materialnih lastnosti za injektirano zidovino se dolžina nihajnih časov skrajša, kar je smiselno, saj se poveča togost konstrukcije. Najdaljši nihajni časi so bili skoraj pri vseh cerkvah, razen pri eni, izračunani z materialnimi lastnostmi iz Bovca, medtem ko smo najkrajše nihajne čase dobili s podatki iz italijanskega standarda OPCM za maksimalne vrednosti materialnih lastnosti. Vrednosti nihajnih časov za različne cerkve za neinjektirano zidovino so med 0,50 in 0,77s, s podatki iz Bovca, med 0,38 in 0,59 s pa s podatki z boljšimi karakteristikami iz italijanskega standarda. Vrednosti nihajnih časov injektiranih zidov s podatki iz Bovca se gibljejo med 0,38 in 0,59 s, s podatki iz italijanskega standarda OPCM pa med 0,30 in 0,52 s.

Pri analiziranju potresne odpornosti so bile ugotovljene velike razlike za vrednosti koeficientov potresne odpornosti SRC za smeri X in Y. Potresne odpornosti SRC v smeri Y so minimalnih vrednost. V Y smeri so vrednosti SRC od smeri X manjše za 36 do 73 % glede na neinjektirane materialne karakteristike. Za karakteristike injektiranih zidov pa je razlika med smerema še večja, saj so vrednosti v Y smeri manjše za 26 pa kar do 81 %. Vzrok za takšne razlike je razporeditev zidov, ki je značilna za cerkve, kjer je večji delež zidov v X smeri. Opazne so tudi razlike med koeficienti potresne odpornosti, izračunanimi z materialnimi karakteristikami zidovine pred injektiranjem in po injektiranju, kjer so povečanja neodvisna od smeri. V povprečju se SRC z injektiranjem zidov pri minimalnih italijanskih vrednostih poveča v obeh smereh za 25 %, pri maksimalnih v smeri X za 32 %, v Y smeri za 13%, največ pa pri vrednostih iz Posočja, in sicer 49 % za X smer ter kar za 56 % za Y smer. Pri teh primerjavah sta izvzeta SRC-ja za cerkev v Čezsoči, kjer rezultati izstopajo.

Če gledamo merodajne SRC koeficiente za vse cerkve v odvisnosti od predpostavljenega materiala, dobimo tako za neinjektirano kot injektirano stanje za večino primerov tako v smeri X kot Y najboljše rezultate z boljšimi italijanskimi karakteristikami (14 primerov od 16), najbolj kritične pa z italijanskimi minimalnimi (11 primerov od 16).

Razlike so bile ugotovljene tudi pri analizi mejnega pospeška tal ULSPG glede na smer in glede na to ali je zidovina injektirana ali ne. V povprečju se pospešek tal v X smeri z injektiranjem zidov poveča za 32 do 81 % medtem, ko v Y smeri za 19 do 77 % glede na posamezne materialne karakteristike, ki jih primerjamo. Najmanjši mejni pospeški tal so bili v šestih od osmih primerov za smer X in v petih od osmih primerov za smer Y s podatki italijanskega standarda za slabo zidovino medtem, ko so bili največji pospeški tal v vseh osmih primerih za smer X ter v šestih za smer Y dobljeni s podatki italijanskega standarda za maksimalne vrednosti karakteristik zidovine. Vrednosti ULSPG-ja za X smer so med 1,43 in 2,95 m/s² za neinjektirano zidovino, za injektirano zidovino pa med 2,37 in 5,05 m/s². Glede na to, da je projektni pospešek 2,25 m/s², je zahtevam v primeru injektiranja v vseh primerih zadoščeno, z boljšimi italijanskimi karakteristikami pa tudi za neinjektirano stanje za vse cerkve. Veliko manjše vrednosti ULSPG-ja so dobljene za Y smer, saj so med 0,82 in 1,69 m/s² za neinjektirano zidovino, za injektirano zidovino pa med 0,83 in 1,84 m/s². Obnašanje konstrukcije se z ojačitvenimi ukrepi močno izboljša, saj se mejni pospešek tal v Y smeri, ki ga konstrukcija prenese, poveča tudi za štirikratno vrednost izhodiščnega stanja, vendar še vedno nezadostno glede na zahteve EC8.

Pri analiziranju idealizirane histerezne ovojnice je bila opazovana togost konstrukcije kot naklon premice in duktilnost konstrukcije. Togost konstrukcije v Y smeri je zaradi razporeditve zidov z večjim deležem nosilnih zidov v X smeri manjša kot togost konstrukcije v X smeri. Odzivi se za različne cerkve, materialne karakteristike in obravnavane smeri močno razlikujejo. Z injektiranjem zidov se povečuje sila, saj je velikost sile Hid v X smeri je med 1,55 in 5,08 MN za zidovino pred injektiranjem in med 1,84 in 6,94 MN za zidovino po injektiranju. Velikost sile Hid v Y smeri je med 0,59 in 2,02 MN za zidovino pred injektiranjem in od 0,68 do 2,33 MN za zidovino po injektiranju. Končni dolžine pomiki so

zelo različni glede na materialne karakteristike ter analize za posamezno cerkev. Tako potem tudi dobimo različne vrednosti mejnih pospeškov, ki ne sovpadajo nujno z velikostmi SRC.

Primerjava poškodb, ki jih poda 3Muri, s poškodbami, ugotovljenimi iz katastra razpok, lahko smiselno uporabimo za kontrolo delovanja modela. Izkaže se, da se prikazi poškodb, ki jih poda 3Muri, v nekaterih primerih dobro ujemajo s katastrom razpok, kar kaže na to, da je 3Muri do neke mere precej zanesljivo orodje za oceno stopnje poškodovanosti. Pri dveh primerih je v modelu zvonik odneslo, zato so v teh primerih izračunani rezultati vprašljivi. Iz tega razloga sta bila pri dveh primerih narejena nova modela, kjer je bil zvonik skrajšan na višino glavne ladje.

V primerjalni analizi med delovanjem programa Sremb in 3Murija smo primerjali dobljene koeficiente potresne odpornosti SRC. Potresna odpornost je pri izračunih s Srembom v povprečju za polovico večja od izračunov s programom 3Muri. Vzrok za razlike je v največji meri v različnih predpostavkah obeh modelov. Sremb v nasprotju s 3Murijem predpostavlja etažni porušni mehanizem, togo vpetje zidov v stropno konstrukcijo ter tudi izven ravninsko sodelovanje zidov pri prevzemanju potresne obtežbe. Vse omenjeno rezultira k višji nosilnosti. Podobne razlike med potresno odpornostjo v X in Y smeri nastopijo ravno tako kot pri programu 3Muri tudi pri Srembu, kar vendarle nakazuje na kompatibilnost obeh programov. Vrednosti SRC-ja po Srembu so pri neinjektiranih zidovih med 0,18 in 0,25 za X smer in med 0,12 in 0,19 za Y smer. Z injektiranjem se potresna odpornost zidov tako kot pri programu 3Muri poveča. Vrednosti SRC-ja injektiranih zidov so tako za različne cerkve med 0,34 in 0,40 za X smer in med 0,13 in 0,29 za Y smer.

14 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu smo celovito predstavili obnašanje sakralnih objektov v primeru potresne obtežbe ter sistematično analizirali odzive več sakralnih objektov v Posočju. V diplomi so obravnavane cerkve sveti Urh v Bovcu, sveti Anton v Kobaridu, sveti Anton Puščavnik v Čezsoči in sveta devica Marija v Polju.

Na osnovi analize posnetka razpok na objektih po potresih v Posočju (1998 in 2004) smo analizirali porušne mehanizme ter jih primerjali s tipičnimi mehanizmi porušitve sakralnih objektov. Ugotovili smo, da je bila njihova ranljivost predvsem posledica nezadostne mehanske odpornosti zidov ter slabe povezanosti posameznih slopov. Za vsakega izmed obravnavanih objektov, je analiza zajemala splošni opis, opis zasnove posamezne konstrukcije, analizo poškodb po potresih in rezultate seizmične analize, narejene z enim ali obema programoma. Pri tem je bila potresna odpornost določena v odvisnosti od različnih materialnih lastnosti in ob upoštevanju faktorja poznavanja konstrukcije. Izkaže se, da zahtevane potresne odpornosti po določilih Evrokoda 8 pri obravnavanih sakralnih objektih v obstoječem stanju v nobenem primeru ni mogoče doseči. Zaradi specifičnosti arhitekturne zasnove sakralnih objektov je seizmična odpornost v vzdolžni smeri objekta bistveno večja kot v prečni smeri. Pri analizah tovrstnih objektov se postavlja tudi vprašanje merodajnosti kontrolne točke (elementa oz. konstrukcijskega sklopa) pri kontroli talnega pospeška pri doseženem mejnem stanju. Pri vseh objektih so bili namreč najbolj ranljivi prav zvoniki. Izbira ustreznih materialnih parametrov pri analizi rezultira s spremembami tako brezdimenzionalnega koeficiente potresne odpornosti (SRC), kot nihajnega časa konstrukcije.

S seizmično analizo sakralnih objektov smo ugotovili, da je odziv teh objektov na potresne obremenitve težko enolično opisati. Zaradi arhitekturne raznolikosti sakralnih objektov in tlorisne razporeditve zidov, ki je značilna za cerkve, ter velikega števila odprtih različnih velikosti se rezultati med posameznimi cerkvami močno razlikujejo. Zato je za oceno učinkovitosti seizmične analize pomembna kontrola primerjava dobljenih numeričnih rezultatov s katastri razpok. Nelinearno seizmično analizo objektov smo naredili s pomočjo dvema programskima paketoma – Sremb in 3Muri. Oba programska paketa slonita na analizi

konstrukcije ob definiranju posameznih konstrukcijskih elementov. S to razliko da Sremba upošteva etažni odziv konstrukcije, 3Muri pa celoviti odziv. Pri primerjavi Sremba s 3Murijem se izkaže, da je togost pri računu s 3Murijem precej manjša, kar je posledica modela z ekvivalentnimi okvirji ter upoštevanja celotnega objekta in ne le kritične etaže (kar pa za cerkve ni značilno). S programom 3Muri pa smo dobili bistveno boljše ujemanje poškodb na objektu z numerično dobljenimi, vendar pa tudi bistveno manjše vrednosti za SRC, kar je verjetno posledica tako samega modela, kot tudi dejstva, da so v Srembu upoštevani zidovi, pravokotni na ravnino obremenjevanja. Vendar pa so zaradi upoštevanja disipiranja energije tudi v prekladnih elementih duktilnosti pri 3Muriju večje, kar ima za posledico višje maksimalne pospeške, ki jih objekt prenese.

Pri ugotavljanju, kakšen vpliv ima utrditev zidov z injektiranjem na odziv konstrukcije je bilo ugotovljeno, da konstrukcija z injektiranjem postane bolj toga in, da se ji potresna odpornost poveča. Zahtevana potresna odpornost v vseh analiziranih primerih ni bila dosežena kljub injektiranju zidov. Pri nekaterih zidovih cerkva je bilo opaziti, da se z injektiranjem tudi spremeni merodajni porušni mehanizem, saj se z injektiranjem izboljša sodelovanje zidov pri prevzemu potresne obtežbe. Na osnovi analize štirih tipičnih objektov lahko sklepamo da zahtevane potresne odpornosti ne moremo doseči samo z injektiranjem zidov. Potrebni so tudi drugi ukrepi. Ranljivost tovrstnih objektov lahko bistveno zmanjšamo s povezovanjem zidov z vodoravnimi vezmi, kar smo numerično tudi pokazali. Vendar zaradi specifičnosti arhitekturne zasnove sakralnih objektov, kjer je seizmična odpornost v vzdolžni smeri objekta bistveno večja kot v prečni smeri, se zastavlja vprašanje kako izkoristiti še nosilnost elementov obremenjenih pravokotno na svojo raven. Zaradi osobenosti kamnite zidovine, zanesljivih modelov za enkrat še ni.

Na opravljenih analizah, ki so bile izvedene za vsak sakralni objekt posebej, je bilo ugotovljeno, da imajo materialne lastnosti zidovine zelo velik vpliv na potresno odpornost. Posledica napačne izbire materialnih lastnosti lahko vpliva na spremenjen porušni mehanizem. Ugotovljeno je bilo, da s podatki iz italijanskih standardov (OPCM) dobimo višjo potresno odpornost kot s podatki iz tehnične pisane v Bovcu v obeh smereh (X, Y). Če bi imeli na voljo dejanske podatke zidovine analiziranih sakralnih objektov predvidevamo, da bi dobili z njimi

bolj verodostojne rezultate kot s podatki iz literature. Zidovi cerkva so namreč narejeni iz kamnov pravilnih oblik in najboljših materialov v tistem času. Zato je pomembno, da pred saniranjem nekega sakralnega objekta predhodno opravimo kombinacijo porušnih, delno porušnih in neporušnih preiskav konstrukcije, s katerimi bi lahko pridobili zanesljive mehanske lastnosti zidovine in s tem bolj ustrezno oceno stanja konstrukcije.

VIR

LITERATURA

Bosiljkov, V., Gostič, S., Kržan, M., Antolinc, D., Žarnić, R. Izdelava in demonstracija modela za načrtovanje ohranjanja umetnostnozgodovinske dediščine v vojnih spopadih : končno poročilo za CRP MIR M4-0207. Ljubljana: UL FGG: ZRMK Institut, 2009.

Cecchi, R., Goretti, A., Faccio, P., Carbonara, G., Jamiolkowsky, M., Marchetti, L., Rocchi, P., Calvi, M., Lagomarsino, S., Borri, A., Croci, G., Manfredi, G., Modena, C. And Viggiani, C., Linee Guida per l'applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all'Ordinanza P.C.M. 3274/2003, Dipartimento della protezione civile, 2005.

Cotič, P. Eksperimentalno podprta parametrična nelinearna seizmična analiza kamnite zidane stavbe : diplomska naloga. Ljubljana: [P. Cotič], 2010. XXI, 117 str.,

Fajfar, P. 2002. Poenostavljena nelinearna analiza konstrukcij pri potresni obtežbi. Gradbeni vestnik 51: 302–315.

Galasco, A., Lagomarsino, S., Penna, A., Cattari, S. 2009. TREMURI Program: Seismic Analyser od 3D Masonry Buildings. University of Genoa.

Gostič, S., Dolinšek, B. Upoštevanje in izkušnje pri uporabi Evrokoda 8 v okviru popotresne obnove v Posočju. V: VUKELIČ, Željko (ur.). Potresno varna gradnja : zbornik 8. dneva inženirjev. Ljubljana: Inženirska zbornica Slovenije - IZS, 2008, str. 27-31.

Koch, W. 1999. Umetnost stavbarstva : veliko standardno delo o evropskem stavbarstvu od antike do danes. Ljubljana, Mladinska knjiga

O.P.C.M. 3274, 2003. Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.

SIST EN 1990: 2004, Evrokod: Osnove projektiranja konstrukcij. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 87 str.

SIST EN 1991-1-1: 2004, Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-1. del: Splošni vplivi – Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 33 str.

SIST EN 1998-1: 2005, Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 229 str.

SIST EN 1998-1: 2005/A101, Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe – Nacionalni dodatek. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 11 str.

SIST EN 1998-3: 2005, Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 3. del: Ocena in prenova stavb. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 89 str.

SIST EN 1998-3: 2005/A101, Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 3. del: Ocena in prenove stavb – Nacionalni dodatek. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 4 str.

S.T.A. Data. 2009. 3Muri v4.0x User manual.

http://www.3muri.com/3muri/documenti/3Muri4.0_User_Manual.pdf (1.7.2010).

S.T.A. Data. 2009. Non-linear Seismic Analysis of Masonry Buildings.

<http://www.3muri.com/3muri/documenti/3MuriGeneralDescription.pdf>. (1.7.2010).

Tomaževič, M. 1987. Zidane zgradbe na potresnih območjih. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo.

Tomaževič, M. 2009. Potresno odporne zidane stavbe. Ljubljana, Tehnis: 301 str.

SPLETNI VIRI

Apsida.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Apsida> (27. 12.2010)

Cerkvena ladja.

http://sl.wikipedia.org/wiki/Cerkvena_ladja (27. 12. 2010)

Kapela.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Kapela> (27. 12. 2010)

Karta.

http://www.arso.gov.si/potresi/podatki/projektni_pospesek_tal.html (27.12.2010)

Narteks.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Narteks> (27. 12. 2010)

Notre-Dame d'Amiens.

[http://sl.wikipedia.org/ Notre-Dame d'Amiens](http://sl.wikipedia.org/Notre-Dame_d'Amiens) (27.12. 2010)

Oltar.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Oltar> (27.12.2010)

Portal.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Portal> (27.12.2010)

Potres 1976.

<http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20aktivnost/potres1976.html> (14.12.2010)

Potres 1998,

<http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20aktivnost/potres1998.html> (14.12.2009)

Potres 2004.

<http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20aktivnost/potres2004.html> (14.12.2010)

Zakristija.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Zakristija> (27. 12. 2010)

Zemljevid.

<http://zemljevid.najdi.si> (14.12.2010)

Zvonik.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Zvonik> (27. 12. 2010).